

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

**PROBLÉMY PŘI TVRDÉM PÁJENÍ TEPELNÉHO
VÝMĚNÍKU HLINÍKOVOU PÁJKOU**

**(THE PROBLEMS OF HARD BRAZING HEAT
EXCHANGER WITH ALUMINIUM SOLDER)**

Student:

Michal Rychlý

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.

Ostrava 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání bakalářské práce

Student:

Michal Rychlý

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Problémy při tvrdém pájení tepelného výměníku hliníkovou pájkou
The Problems of Hard Brazing Heat Exchanger with Aluminium Solder

Zásady pro vypracování:

1. Provést studium vad při současném pájení dílů výměníků.
2. Návrh alternativních možností pájení dílů výměníků.
3. Provést zkušební pájené spoje po úpravě metody pájení.
4. Vyhodnocení pájených spojů.
5. Návrh postupu pájení pro dosažení vyhovujících spojů.

Seznam doporučené odborné literatury:

KUČERA, J. *Teorie svařování*. Ostrava: VŠB Ostrava, 1991.
KOUKAL, J., SCHWARZ, D., HAJDÍK, J. *Materiály a jejich svařitelnost*. (Učební texty pro kurzy IWE/IWT). Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009, 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
TURŇA, M. *Špeciálne metódy zvarovania*. Bratislava: ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00097-9.
HLAVATÝ, I. *Teorie a technologie svařování*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009, poslední revize 20. 10. 2011. Dostupné z: < <http://fs1.vsb.cz/~hla80> >. ISBN 978-80-248-2414-7.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .. 14.5.2012

..... Rychlý

podpis studenta

Prohlašuji, že

- Jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 14.5.2012

.....
Rychlý
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Michal Rychlý

Adresa trvalého pobytu autora práce: Na Holbě 488, Hanušovice

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

RYCHLÝ, M. *Problémy při tvrdém pájení tepelného výměníku hliníkovou pájkou: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2012, 68 s., Vedoucí práce: Hlavatý, I.

Bakalářská práce se zabývá řešením problémů tvrdého pájení tepelných výměníků hliníkovou pájkou – v úvodní teoretické části jsou uvedeny základní poznatky o pájení, údaje, týkající se nejběžnějších používaných metod pájení, seznámení se s rozdělením a vlastnostmi hliníkových slitin, následně druhy vad, které se vyskytují u pájených spojů. V experimentální části jsou uvedeny alternativní možnosti pájení tepelných výměníků, návrh nové technologie pájení plamenem. Další částí je experiment indukčního pájení s uvedením návrhu postupu pájení pro dosažení vyhovujících spojů. V závěru práce je uvedeno vyhodnocení dosažených výsledků.

ANOTATION OF BACHELOR THESIS

RYCHLY, M. *The Problems of hard brazing heat exchanger with aluminium solder: bachelor thesis*. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2012, 68 p., Thesis, head: Hlavaty, I.

This bachelor thesis deals with resolving problems of hard brazing heat exchangers with aluminium solder – the first theoretical section provides basic knowledge about brazing, information regarding the most used method in brazing, familiarization with the distribution and the properties of aluminium alloys, further kinds of defects that occur at the solder joints. In the experimental part, alternative options of brazing heat exchangers and a proposal of new technology of flame brazing are shown. The next part is an experiment of the induction brazing process with the introduction of a proposal of a process to achieve satisfactory solder joints. In the conclusion of thesis stated evaluation of results.

Obsah

1.	Úvod.....	- 10 -
2.	Popis dílu.....	- 10 -
2.1	Materiály pájeného celku	- 11 -
2.1.1	Historie výroby hliníku	- 11 -
2.1.2	Vlastnosti hliníku a jeho slitin.....	- 12 -
2.1.3	Materiály výměníku	- 16 -
2.2	Technologie a terminologie pájení.....	- 21 -
2.2.1	Výhody a nevýhody pájení.....	- 22 -
2.2.2	Přehled a rozdělení metod pájení	- 23 -
2.2.3	Pájky.....	- 26 -
2.2.4	Tavidla pro pájení	- 30 -
2.2.5	Teploty při pájení	- 32 -
2.3	Kamerový systém a tvarová kontrola.....	- 33 -
2.4	Vznik vad a jejich druhy	- 34 -
2.3.1	Druhy vad.....	- 35 -
2.3.1.1	Způsob zjišťování vad pájených spojů.....	- 39 -
2.3.1.2	Vady zjistitelné na mikrostruktuře	- 40 -
2.3.2	Doprovodné jevy při vzniku vad	- 41 -
3.	Alternativní možnosti pájení dílů výměníků v praxi.....	- 43 -
3.1	Pájení průběžnou pecí v ochranné atmosféře.....	- 43 -
3.2	Pájení indukčním ohřevem.....	- 45 -
4.	Návrh nové technologie a provedení experimentu pájení výměníků	- 46 -
4.1	Stávající technologie pájení výměníků	- 47 -
4.1.1	Pájení plamenem	- 47 -
4.1.2	Používané strojní zařízení	- 48 -
4.1.3	Pracovní postup a příprava pájených spojů.....	- 51 -
4.2	Návrh nové technologie pájení výměníků plamenem	- 52 -
4.3	Provedení experimentu pájení indukčním ohřevem.....	- 54 -
4.3.1	Zkoušky provedené pájením indukčním ohřevem	- 54 -
4.3.2	Vyhodnocení experimentu indukčního pájení.....	- 60 -
5.	Technologický postup přípravy kontrolního kusu a přípravy vzorků pro mikroskop.....	- 60 -
5.1	Technologický postup přípravy kontrolního kusu (0B2 300 333 A) pro řez	- 61 -
5.2	Technologický postup přípravy kontrolního kusu (0B2 300 333 A) pro mikroskop:	- 62 -
6.	Závěr a zhodnocení dosažených výsledků	- 64 -

Poděkování..... - 66 -

Seznam použitých pramenů: - 67 -

Seznam použitého značení:

Značení	Význam	Jednotka
R_m	mez pevnosti materiálu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu materiálu	[MPa]
A	tažnost	[%]
t_{prac}	pracovní teplota	[°C]
σ	povrchové napětí	[N.m ⁻¹]
θ	úhel smáčení	[°]
σ_h	adhezní napětí	[N.m ⁻¹]
ρ	měrná hmotnost pájky	[kg.m ⁻³]
g	tíhové zrychlení	[m.s ⁻²]
r	Poloměr roztavené pájky	[mm]
h	Výška kapaliny pájky	[mm]

1. Úvod

Výroba tepelných výměníků z hliníkových slitin přináší problémy při jejich pájení. Firma ZKL Hanušovice, a.s. jejíž hlavním výrobním artiklem je výroba dílů pro automobilový průmysl se již delší dobu zabývá přesným ohýbáním trubek. Strojírenské výrobě se zde věnují od roku 1957, kdy se závod sloučil se společností Karosa Vysoké Mýto. O rok později se firma stala pobočným závodem výrobce traktorů a ložisek – Zetor Brno, a byla zde spuštěna výroba traktorových dílů. Výrobní program reprezentovaly, diskové brzdy, tlumiče výfuků a široký sortiment vzduchových a hydraulických trubek.

Po roce 1990, kdy nastal pokles výroby traktorů, reagovala firma zásadními změnami ve výrobním programu. V roce 1995 firma navázala spolupráci s automobilovým koncernem VW na dodávky přesně tvarovaných trubek. Společnost vyrábí trubky topení, chlazení, odvodušňování a pro palivové systémy motorů osobních automobilů. Zpracovávají zde ocelové trubky o průměrech od 8 do 42 mm převážně z materiálů EN 10305 a hliníkových slitin. Ve velké většině, se jedná o trubky slitin hliníku legovaných na bázi Al-Mg-Si. Tyto trubky používají u topení, pro odvodušňování či pro olejový systém motorů. Důležité je, aby výrobky kromě přesnosti měli i odpovídající povrchovou úpravu, toho je dosaženo nanesením vrstvy Zn nebo ZnNi.

2. Popis dílu

Aplikace hliníku a jeho slitin v automobilovém průmyslu je dána zejména jeho hmotnostními vlastnostmi. Jednou z oblastí, kde se může efektivně využít hliník je i chladič automobilu, kde se pro tuto aplikaci používá tepelný výměník, který zaručuje vysokou účinnost celého systému. Chladiče zajišťují kromě průběžného ochlazování chladicí kapaliny, také i správnou funkci instalované klimatizační jednotky. [1,10]

Při montážích jednotlivých dílů, stavebních skupin nebo celků lze využít různé metody spojování. Volba vhodné metody je tedy realizována z technického a ekonomického hlediska. V úvahu bereme technologičnost konstrukce, dále funkci konstrukce, které odpovídá způsob spojování. Zadaná součást, určena k řešení problému s pájením, je trubka složitě tvarově upravená, která slouží jako tepelný výměník v převodovce. Součást se skládá z trubky, pájecího kroužku a koncovky.



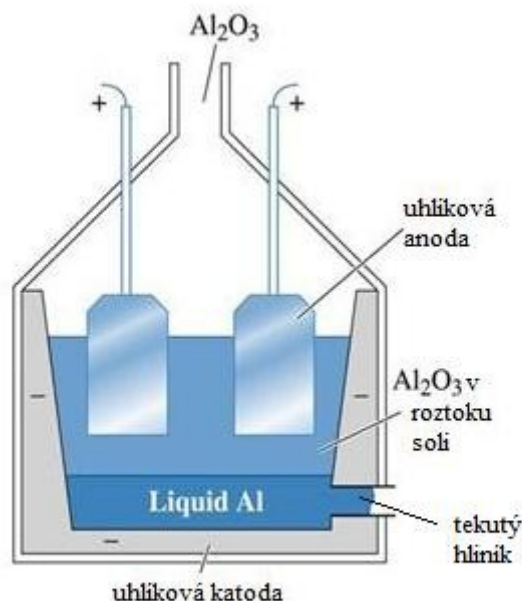
Obr. 1 *Tepelný výměník*

2.1 Materiály pájeného celku

2.1.1 Historie výroby hliníku

Hliník je v přírodě po kyslíku a křemíku nejrozšířenější prvek, který však byl objeven na sklonku 19. stol.

Na jeho existenci poukázal Angličan Humhry Davy, který již předtím pozoroval rozžhavení drátu při průchodu elektrického proudu a později zkonstruoval bezpečnostní důlní lampu. Objeven byl tedy nový prvek Aluminium. Isolovat hliník od jeho hrubé podoby v přírodě, (zejména z bauxitu) se podařilo až dánskému chemikovi Hansu Christianovi Oerstedovi roku 1825. Samotná výroba hliníku byla nákladná, což bránilo jeho rozšíření. Později byl objeven způsob jak hliník vyrábět průmyslovým způsobem levněji, avšak až výroba hliníku průmyslově pomocí elektrolýzy v roce 1886 se stala základem dnešní používané výroby hliníku.[6]



Obr. 2 výroba hliníku elektrolýzou [5]

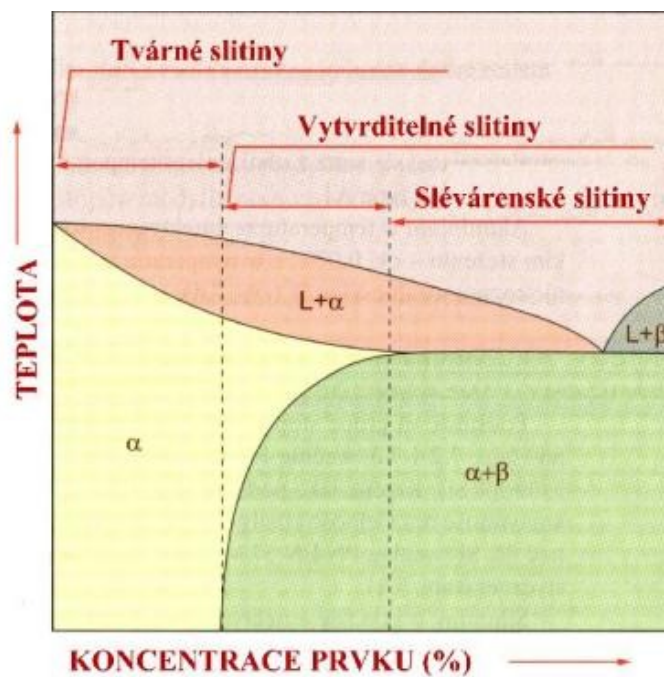
2.1.2 Vlastnosti hliníku a jeho slitin

Hliník patří mezi kovy lesklé stříbřité barvy, který se díky své měrné hmotnosti 2699 kg.m^3 , řadí mezi tzv. lehké kovy. Krystalizace hliníku probíhá v kubické soustavě s plošně středěnou mřížkou.

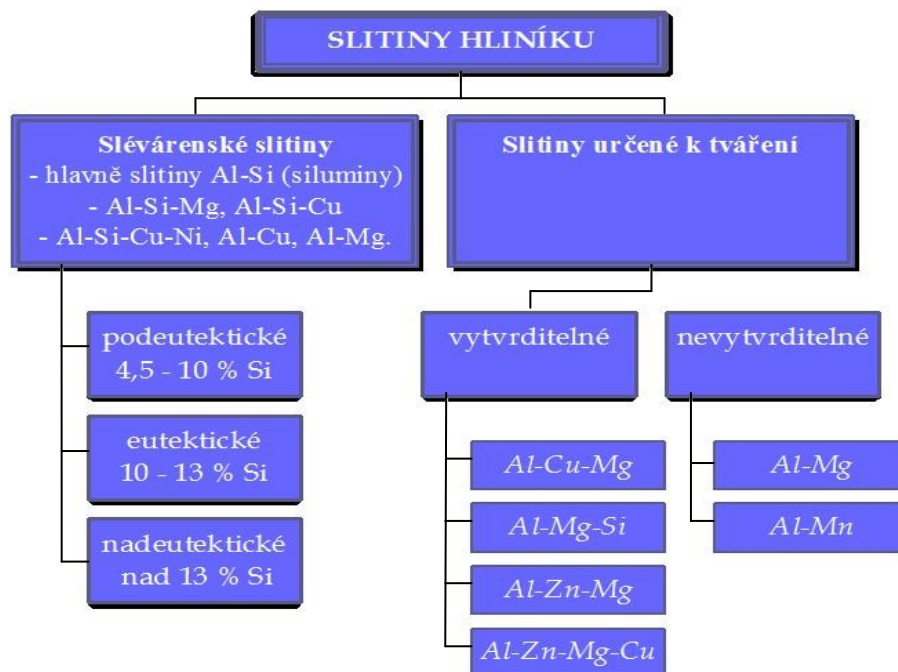
Čistý hliník se vyznačuje teplotou tavení 660°C a pevností kolem 70 MPa . K dalším vlastnostem hliníku patří dobrá tepelná a elektrická vodivost a jeho odolnost proti korozi. Tloušťka této vrstvy je kolem $0,01 \mu\text{m}$ a poskytuje důležitou ochranu před další korozi. Velikost této vrstvy lze v některých případech uměle zvýšit až na několiknásobek ($25 \mu\text{m}$) tzv. Eloxováním.[3,5]

Některé z vlastností hliníku, zejména mechanické, lze ovlivňovat přidáváním různých legujících prvků do čistého hliníku. Tímto vznikají hliníkové slitiny, jež jsou obvykle tuhé roztoky s omezenou rozpustností. Hliníkové slitiny se vyrábějí buď legováním primárního hliníku z prvovýroby s předepsanými prvky, nebo dolegováním tavenin získaných přetavením vratného odpadu. Hliníkové slitiny jsou děleny podle různých hledisek. V praxi se hliníkové slitiny rozdělují na tvářené a slévarenské. Tvářené slitiny se podle tepelného zpracování dále dělí na slitiny vytvrditelné a nevytvrditelné. Vytvrzováním se rozumí tepelné zpracování, díky

kterému, lze zlepšit některé mechanické vlastnosti, zejména pevnost. Rozdělení slitin je schematicky znázorněno na následujících obrázcích.[1,5]



Obr. 3 Slitiny hliníku.[8]



Obr. 4 Rozdělení hliníkových slitin. [8]

Nevytvrditelné slitiny, jsou slitiny, u kterých nelze tepelným zpracováním zvýšit pevnost ani tvrdost, případně by byl výsledný efekt velice malý, přinejmenším by vynaložené náklady byli zbytečně velké. Tyto slitiny lze za studena zpevňovat tvářením. Mezi tyto slitiny se řadí slitiny na bázi Al-Mn a Al-Mg.[1,8]

Mezi významné představitele se řadí:

- AlMn1 – vhodný na obaly, plechy, nádoby, používá se v chemickém a potravinářském průmyslu. Díky obsahu manganu má výbornou tvářitelnost
- AlMg2 – používá se v chemickém a potravinářském průmyslu
- AlMg5 – používá se v automobilovém průmyslu na karoserie. Obsah hořčíku zvyšuje pevnost a zajišťuje dobré vlastnosti při nízkých teplotách.
- AlMg4.5Mn1 – odolný proti mořské vodě, využití ke stavbě lodí. [19]

Vytvrditelné slitiny, jsou slitiny, které díky tepelnému zpracování mohou výrazně zvyšovat pevnost, avšak na úkor tažnosti. Vytvrzování spočívá v rychlém ochlazení z teploty okolo 500 °C ve vodě či oleji a dále přirozeným nebo umělým stárnutím litiny. Při přirozeném stárnutí může proces probíhat několik dní až měsíců. U umělého stárnutí při teplotách 50 – 150 °C je proces mnohem rychlejší, kdy se jeho doba zkrátí na několik hodin. [1]

Máme 2 základní skupiny:

- Slitiny s nízkou a střední pevností – AlMgSi, AlZnMg pevnost 200 až 350 MPa
- Slitiny s vysokou pevností – AlCuMg, AlZnMgCu pevnost 400 až 700 MPa.

Nejvýznamnějšími představiteli jsou:

- AlMg1Si1 – dobrá svařitelnost, tvářitelnost za tepla, použití při výrobě tvarově složitých výrobků (chladicí žebra el. motorů)
- AlZn4Mg1 – obdobné vlastnosti a použití jako předchozí typ
- AlCuMg – slitina známá pod obchodním názvem jako “dural“, je charakteristická vysokou pevností, ale horší tvářitelností, používá se na skříň kolejevoých vozidel

- AlZn6MgCu – nejpevnější vytvrditelná slitina, tzv. „Superdural“ má pevnost až 700 Mpa, stejné použití jako u duralu. [1]

Slévárenské slitiny jsou méně tvářitelné ve srovnání se slitinami pro tváření. Jejich předností je dobrá zabíhavost do formy, malý sklon ke vzniku trhlin a staženin. Mechanické vlastnosti těchto slitin jsou závislé na způsobu lití a na chemickém složení, největší pevnost v tahu bývá kolem 250 MPa. Hrubozrnná struktura s nejméně příznivými pevnostními charakteristikami vzniká při lití do písku. Jemnozrnná struktura se pak objevuje při tlakovém lití nebo při lití do kovových forem. Strukturu s vlastnostmi slévárenských slitin je možné ovlivňovat úpravami tekutého kovu, které spočívají v přidání malého množství vhodně zvolené látky, která ovlivňuje proces krystalizace. Jednou z těchto úprav je „modifikování“, kterým se ovlivňuje způsob růstu krystalizačních zárodků a jehož důsledkem jsou morfologické změny vyloučených fází. [1,19]

Hlavní skupiny slévárenských slitin:

- Al-Si, tzv. „Silumin“ – výborná zabíhavost a dobrá odolnost proti trhlinám za tepla, jedná se o nejvýznamnější slévárenské slitiny. Poprvé byly binární slitiny tohoto typu vyrobeny francouzským chemikem Sainte-Clair Devilem před více než 150 lety. V současnosti existují slitiny s vysokou odolností proti korozi, nízkým koeficientem lineární smrštivosti a vyhovujícími mechanickými vlastnostmi.
- Al-Mg – nejlepší slévárenská slitina, vysoká odolnost proti korozi
- Al-Cu - dobrá odolnost proti opotřebovávání i za vysokých teplot (písty spalovacích motorů)
- Al-Zn – dobrá slévatelnost, snadné tepelné zpracování, dobré mechanické vlastnosti. [1]

2.1.3 Materiály výměníku

Materiál trubky:

Materiál EN AW- 3103 H 111 (AlMn1) dle ČSN 424232

Tento druh slitiny patří mezi tepelně nevytvrditelné slitiny, jelikož nevelké přesycení tuhého roztoku α umožňuje nepatrné zvýšení pevnosti. Důležitou vlastností, kterou se vyznačuje mangan při vlivu na hliník a jeho slitiny, je snížení náchylnosti k interkrystalické korozi a korozi pod napětím. Jejich vlastnosti jsou podobné jako u slitin Al – Mg. Průmyslově probíhá výroba pouze slitin AlMn1. [1]

Materiál EN AW – 3103(AlMn1) má podobné vlastnosti jako pantal (AlMgSi), používá se zejména na trubky a málo namáhané součásti. Díky až 1,5% obsahu manganu mají o 20% větší pevnost než slitiny hliníku patřící do skupiny 1000, dle ČSN 424432 tedy tato slitina je tepelně nezpracovatelná. Uplatňuje se v architektuře a v oblasti výměníků tepla. Je pevnější než čistý hliník při zachování vysoké tvárnosti. [1,7]

Tab. 1 Obsah prvků ve slitině hliníku EN AW – 3103 (AlMn1) v % hmot. [7]

chemický prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
(%)	0,5	0,7	0,1	0,9 - 1,5	0,3	0,1	0,2	-

Tab. 2 Mechanické vlastnosti slitiny hliníku EN AW – 3103 (AlMn1). [8]

Název vlastnosti	Jednotky	Hodnoty
Mez pevnosti Rm	[MPa]	95 - 130
Mez kluzu Rp 0,2	[MPa]	35
Tažnost (A)	[%]	25

Materiál koncovky:

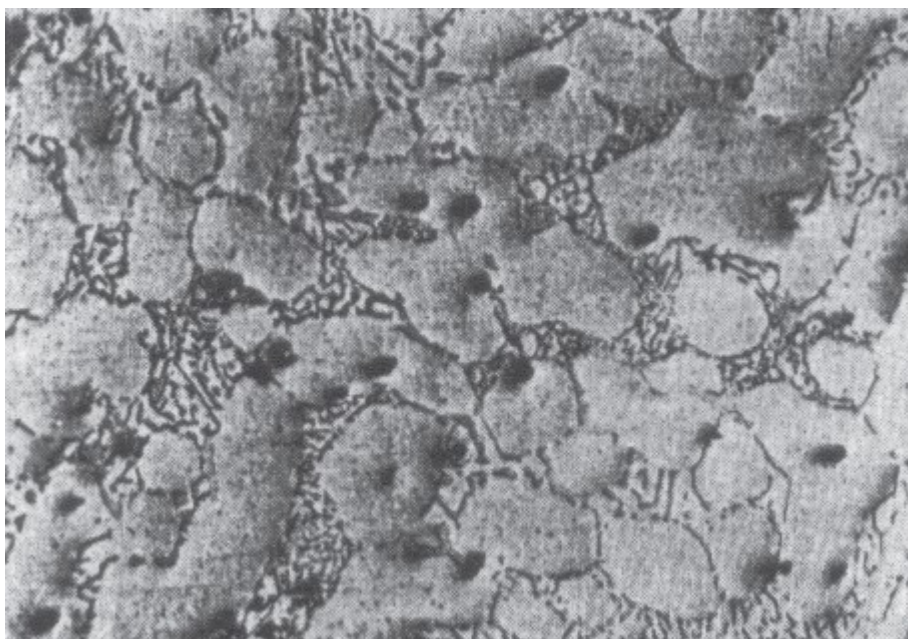
Materiál EN AW- 6082 (AlMgSi1Mn) ČSN 424400



Obr. 5 hliníková koncovka trubky

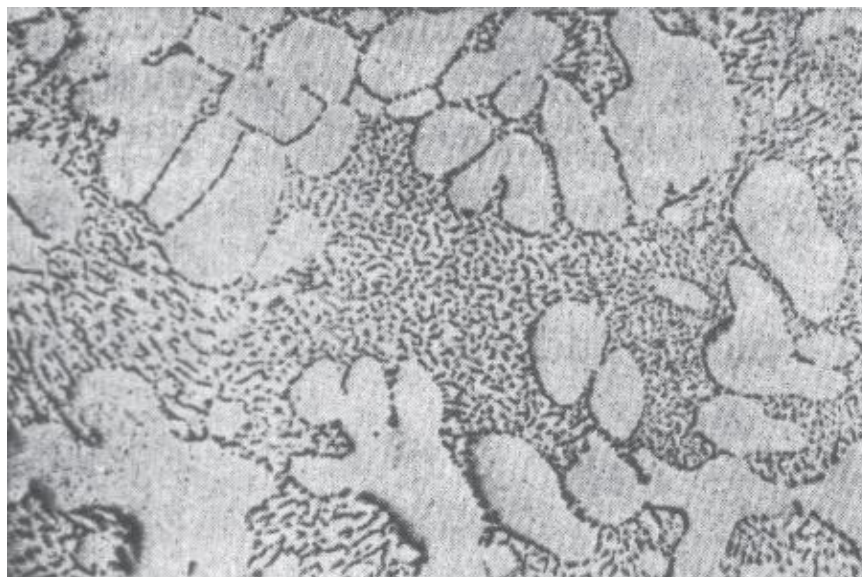
Slitiny hliníku typu Al-Mg-Si jsou slitiny, ve kterých se vždy nachází určitý obsah manganu a železa, či mědi. Malé množství manganu do 0,3 % mírně zvyšuje pevnost slitiny, naopak vyšší zastoupení manganu ve slitině působí snižování pevnosti. Vliv manganu je také příznivý v oblasti zjemnění zrna a to tím výrazněji, čím je jeho zastoupení ve slitině vyšší. Obsah hořčíku se obvykle pohybuje v rozmezí od 0,4 do 1,2 (až 1,5) hm. % a obsah křemíku od 0,4 do 1,2 %. Obsah mědi je u této slitiny velmi nízký, což je relativně nevýhodou, jelikož velice výrazně zvyšuje pevnost. Obsah železa se pohybuje v rozsahu 0,1 až 0,5 hm. % a je pokládáno v tomto množství za nečistotu. [1,5,8]

Z hlediska binárních diagramů tvoří slitiny Al-Mg-Si složitou soustavu. Pokud zanedbáme vliv manganu a železa, které tvoří slitiny omezeně rozpustné v tuhém základním roztoku základního kovu, je možno z hlediska rovnovážného diagramu řešit tyto slitiny jako soustavu tří kovů (hliník, hořčík, křemík). Dvě z těchto komponent a to hořčík a křemík tvoří v binárním systému sloučeninu Mg_2Si . [1]



Obr. 6 Fáze Mg_2Si v nevytvrzené slitině [1]

Tento druh slitin se vyznačuje značnou stabilitou tuhého roztoku a proto po rozpouštěcím ohřevu o teplotě 500 – 540 °C nemusí být ochlazovány takovou rychlostí jako např. Al-Cu-Mg. Stabilita tuhého roztoku je tím větší, čím nižší je obsah křemíku proti obsahu hořčíku. Takové slitiny lze ochlazovat i v proudu vzduchu. Pokud je obsažen vyšší obsah křemíku je nutno ochlazovat ve vodě. [1,7]



Obr. 7 Vytvrzená slitina Al-Si-Mg zv. 100x [1]

Tab. 3 Obsah prvků ve slitině hliníku EN AW- 6082 (AlMgSi1Mn) v % hmot. [7]

chemický prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
(%)	0,7 - 1,4	0,5	0,1	0,4 - 1	0,7 - 1,2	0,25	0,2	0,1

Tab. 4 Mechanické vlastnosti slitiny hliníku EN AW- 6082 (AlMgSi1Mn) [8]

Název vlastnosti	Jednotky	Hodnoty
Mez pevnosti Rm	[MPa]	295
Mez kluzu Rp 0,2	[MPa]	250
Tažnost (A)	[%]	8

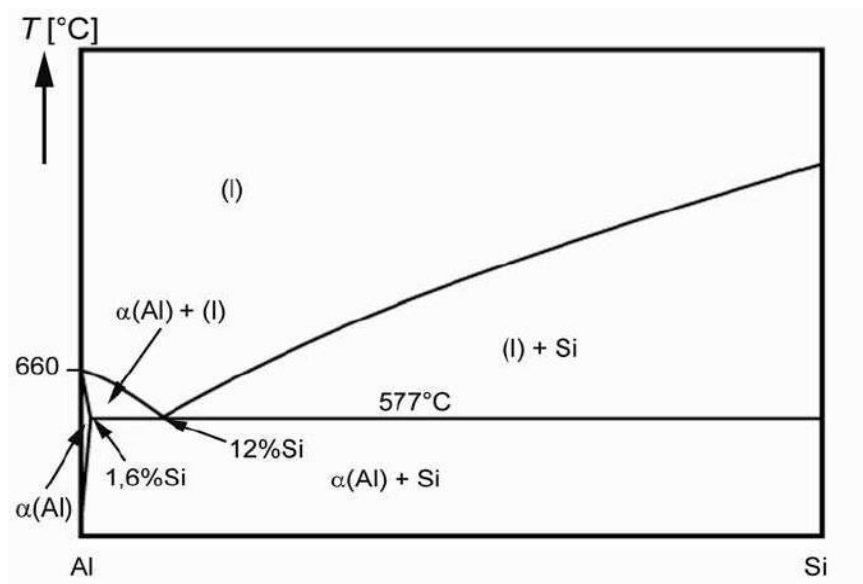
Materiál pájky [1]:

Materiál EN AW 4047A (AlSi12)

Průmyslový význam slitin Al-Si je podmíněn jejich vysokou zabíhavostí, nízkým sklonem k tvorbě staženin a také možností ke svařování a pájení. Tento druh slitin patří mezi nejdůležitější používané průmyslové slitiny hliníku s malými přísadami kolem 0,01 hm% Na nebo Sr. Tyto slitiny značně zlepšují mikrostrukturu a mechanické vlastnosti binárních slitin. Do slitin Al-Si mohou být též přidány také Cu nebo Mg za účelem vytvrzování stárnutím. [9]

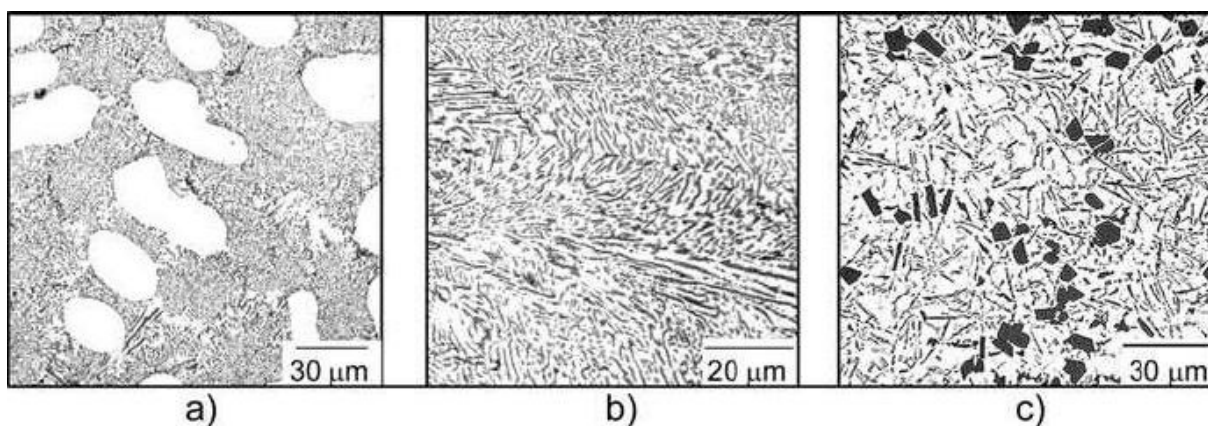
Mechanické vlastnosti těchto slitin závisí v první řadě zejména na obsahu křemíku. S jeho rostoucím obsahem, roste též tvrdost těchto slitin, ale klesá tažnost, zejména při nadeutektickém obsahu Si. Z toho lze usuzovat, že nadeutektické slitiny jsou nejtvrdější a proto jsou průmyslově využívány u součástek namáhaných na otěr, (např. písty). Pro větší zvýšení pevnostních vlastností tohoto materiálu, bývá často provedena operace legování, zejména hořčíkem a mědí. Tyto prvky nám způsobí, že slitiny se stávají precipitačně vytvrditelnými a dosahují pevnosti až 300 MPa. [8,9]

Spektrum použití těchto slitin je v současnosti velmi široké. Za zmínku stojí použití na např. bloky spalovacích motorů, písty, hlavy válců, disky, kryty čerpadel.



Obr. 8 Rovnovážný stavový diagram Al-Si [9]

Z hlediska binárních diagramů se siluminy rozdělují na podeutektické se strukturou (α + eutektikum), eutektické se strukturou (eutektikum) a nadeutektické se strukturou (primární křemík + eutektikum). Fáze α je substituční tuhý roztok křemíku v hliníku s maximální 1,59 hm % Si při eutektické teplotě. Se snižující teplotou klesá i rozpustnost a při teplotě 200°C dosahuje přibližně 0,05 % Si. Eutektikum je směs α – fáze a eutektického křemíku vznikající eutektickou přeměnou. Skládá se z eutektických buněk. Jedná se o krystalizační jednotku vznikající při eutektické proměně. Eutektické fáze jsou v eutektických buňkách vyloučeny spojitě. Tyto eutektika bývají charakteristické tím, že je nerozpoznatelná viditelnost mezi eutektickými buňkami. [1,5,9]



Obr. 9 Mikrostruktury slitin: a) podeutektická slitina AlSi10 – primární dendrity α (Al) – (světlé) + eutektikum (α (Al) + Si), b) eutektická slitina AlSi12 – eutektikum (α (Al) + Si), c) nadeutektická slitina AlSi18 – primární krystaly Si (tmavé) + eutektikum (α (Al) + Si) [9]

Tab. 5 Obsah prvků ve slitině hliníku EN AW 4047A (AlSi12) v % hmot. [7]

chemický prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
(%)	11-13	0,6	0,3	0,15	0,1	-	0,2	0,15

Tab. 6 Mechanické vlastnosti slitiny hliníku EN AW 4047A (AlSi12) [8]

Název vlastnosti	Jednotky	Hodnoty
Mez pevnosti Rm	[MPa]	180
Mez kluzu Rp 0,2	[MPa]	145
Tažnost (A)	[%]	15

2.2 Technologie a terminologie pájení

Pájení je dnes jednou z nejstarších metod spojování kovů, ke které se využívá tepelného zdroje. Pájení lze definovat následovně: Jde o metalurgický způsob spojování kovových součástí roztavenou pájkou, kde je podstatné, že pájené plochy nejsou nataveny, jako je to u svařování, ale jsou smáčeny použitou pájkou. Vyhovující spoj je podmíněn dobrou smáčivostí spojovaných materiálů tekutou pájkou. Splněním těchto požadavků vytvoříme podmínky pro uplatnění kovové vazby, případně se vytvoří podmínky pro účinky adhezních a kohezních sil.

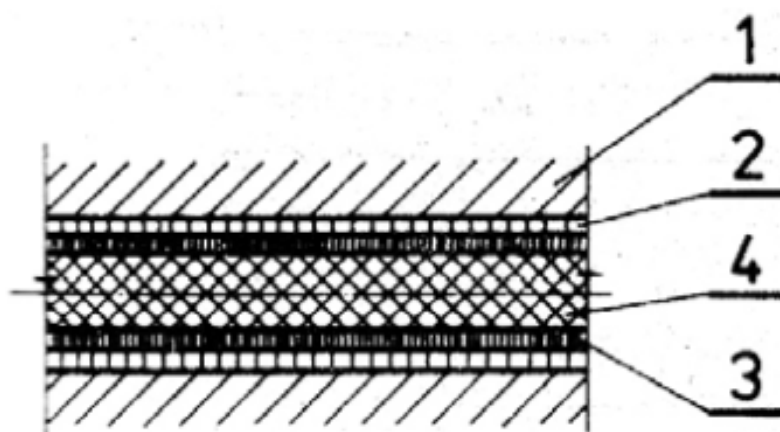
Pájení hliníkových slitin ovlivňuje vznik oxidu hlinitého na povrchu základního pájeného materiálu. U hliníkových slitin je možnost pájení obtížnější než u čistého hliníku.[2,3]

Struktura pájeného spoje a význam difúze při pájení

Při spojování kovů pájením, dochází k působení meziatomových přitažlivých sil, tímto se předpokládá kovový styk. Při vzájemné rozpustnosti pájky a základního materiálu nastává objemová, tedy prostorová difúze viz obrázek 10. Tímto vznikají mezivrstvy, které se dají pozorovat pod mikroskopem. Vznik mezivrstev je tedy podmíněn tím, že alespoň jedna složka

základního materiálu a ještě alespoň jedna složka pájky jsou vzájemně difúzně spojeny, čímž dochází ke vzniku tuhého roztoku. [2,4]

Význam difúze při pájení je založen na tom, že se uskuteční proces přemísťování atomů pájky a základního materiálu, což je dáno rozdílným chemickým složením obou materiálů. Difúzní pochody jsou ovlivněny druhem základního materiálu, zejména jeho krystalografickou mřížkou, tepelnou vodivostí a způsobem zpracování, atd. [2,4]



Obr. 10 schéma struktury pájeného spoje

1 – základní materiál, 2 – difúzní (přechodová) vrstva v základním materiálu, 3 – difúzní vrstva v pájce (která byla roztavena), 4 – pájka [4]

2.2.1 Výhody a nevýhody pájení

Výhody pájení:

- pájením je možné spojovat všechny běžné kovy, rovněž sklo i keramika
- lze spojovat konstrukční součásti s velkými rozdíly tloušťky stěn
- pájecí teploty jsou nižší než teploty při svařování. Díky nižším teplotám vznikají menší napětí, která jsou důsledkem rozdílných teplot.
- pájené spoje jsou vodotěsné a elektricky vodivé

Nevýhody pájení:

- zejména u pájení na měkko je dosahováno spojů s nižšími mechanickými vlastnostmi
- u pájených spojů hrozí napadení spoje korozí, spočívající zejména v rozdílných vlastnostech materiálu pájky a základního materiálu (rozdíly potenciálů).
- malé tolerance šířky spáry mezi materiály jsou důvodem k přesné přípravě dílů před pájením
- vzhledem k povaze pájení je nutné použití tavidla nebo plynu [11]

2.2.2 Přehled a rozdělení metod pájení

Obecně lze pájení rozdělit dle následujících znaků:

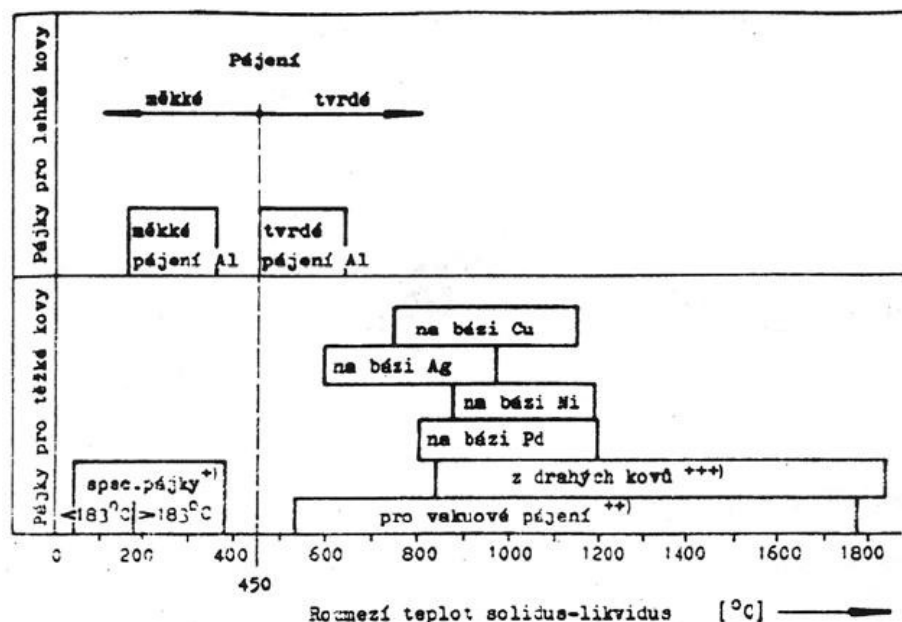
- teploty,
- způsobu spojení,
- tvaru spoje,
- způsobu přidávání pájky,
- způsobu ohřevu,
- prostředí,
- způsobu práce,
- tepelného zdroje,

Metody pájení dle teploty:

Dle pracovních teplot pájení dělíme na tvrdé a měkké pájení. Teplotní hranicí, která rozděluje obě metody, je teplota 450 °C. Z toho pájky používané do teploty 450 °C jsou označovány jako pájky měkké. Pájky používané nad teplotou 450 °C jsou pájky tvrdé.

Pracovní teplota ($t_{\text{prac.}}$) je důležitým faktorem ovlivňujícím pájecí proces. Definujeme - ji jako teplotu pájené plochy, kterou potřebujeme k roztavení pájky a k dosažení její smáčivosti, roztékavosti a kapilarity, čímž docílíme spojení pájky se základním materiálem. Splněním tohoto požadavku musíme dosáhnout vyšší pracovní teploty než je teplota solidu pájky. Při pájení bývá teplota zpravidla vyšší než pracovní teplota, která nesmí být libovolná, což znamená, že nesmí být libovolně vyšší než teplota pracovní. Je-li překročena nejvyšší

přípustná teplota při pájení, dochází ke znehodnocení pájky, tavidla, příp. pájeného základního materiálu. Poškozením pájky je myšlena možnost vypaření některé ze složek pájky a poškození, nebo znehodnocení pájky. Přehled pájek rozdělených dle pracovních teplot je na obrázku 11. [2,3,12]



Obr. 11 Přehled pájek dle pracovních teplot pájení [4]

Metody pájení dle způsobu spojení:

Dle způsobu spojení pájených spojů se vychází z tvaru pájené plochy a z toho je definováno pájení spojovací a nánosové.

- spojovací pájení

Jedná se o metodu sloužící ke spojení dvou nebo více dílů v jeden celek. Spoje jsou obvykle tupé nebo přeplátované. V praxi se setkáváme s různě upravenými spoji, které mohou být například tupý spoj s upravenými pájenými plochami I, V, X; šikmý spoj, přeplátovaný spoj lemovaný, osazený, přehýbaný spoj a jiné.

- nánosové pájení

Využívá se k nanesení vrstvy pájky na pájenou plochu s cílem získat zvláštních vlastností povrchu výrobku. Často se používá jako doplňující proces, který se používá jako nanášení pájky na uzávěry plnicích otvorů, apod. [2,3]

Metody pájení dle způsobu přidávání pájky:

- mezi tento typ pájení řadíme kapilární pájení a pájení do úkosu.
- pájení s přidáváním pájky během pájení
- jedná se o způsob, kdy se pájka přidává do spoje v průběhu pájení.
- pájení s předem vloženou pájkou
- metoda, kdy se pájka vkládá do spoje před samotným pájením.

Metody pájení dle způsobu ohřevu:

- pájení s přímým ohřevem

Pájený předmět je ohříván zdrojem tepla přímo. Ohřívá – li se pájený předmět nepřímým, přes příložku, pak se jedná o pájení s nepřímým ohřevem. [2,3]

Metody pájení dle prostředí [2] :

Vliv prostředí na kvalitu pájeného spoje může mít rozhodující vliv a správná volba prostředí je nezbytná k provedení spoje, který bude mít dobré mechanické a korozní vlastnosti.

- pájení na vzduchu
- probíhá na vzduchu za použití tavidla
- pájení v ochranné atmosféře
- pájení v redukční atmosféře
- pájení ve vakuu
- pájení v kovové lázni
- pájení v neutrální lázni
- pájení v tavidlové lázni

Metody pájení dle technologie pájení:

Jedná se o ruční, mechanizované, automatické pájení a dále pak pájení vpřed a vzad. [2]

Metody pájení dle tepelného zdroje

Zde se nejčastěji využívá metod:

- pájení páječkou
- pájení plamenem
- pájení ponorem
- pájení ve zvlněné kovové lázni
- pájení v peci
- pájení elektrickým odporem
- indukční pájení
- pájení infračerveným zářením
- pájení elektrickým obloukem
- exotermické pájení
- zvláštní metody pájení:
- reakční pájení

U této metody se používají chemické sloučeniny, které se v průběhu pájení rozkládají na produkty, které mají funkci pájky a tavidla.

Pájení ultrazvukem

Jejich výhoda spočívá v působení ultrazvuku, kdy se rozrušují povrchové oxidické vrstvičky.

Pájení vtírací

Výhoda této metody je v možnosti mechanického rozrušení povrchové oxidické vrstvy, která leží na pájené ploše. [2,12]

2.2.3 Pájky

Pájení, jak je uvedeno již v úvodní kapitole, je spojení dvou nejčastěji kovových materiálů roztaveným přídavným materiálem, přičemž ke spojení dochází pouze difúzí obou

materiálů. Pájka je definována jako přídavný kovový materiál používaný při pájení, jehož bod tavení je nižší než bod tavení základního materiálu. [11,12]

Vlastnosti pájek se posuzují z několika hledisek:

- pájka má mít vždy nižší teplotu tavení než spojované kovy
- interval tavení pájky má být co nejužší $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, pájky s větším intervalem tuhnutí ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) se používají pro nánosové pájení,
- pájky mají mít odpovídající smáčivost a roztékavost
- roztavené pájky mají mít co nejnižší povrchové napětí a viskozitu
- důležité je, aby svými vlastnostmi umožnili vznik pájeného spoje

Tvar pájky lze navrhnout podle:

- vlastností základního materiálu a typu konstrukce pájeného spoje,
- použité technologie a metody pájení,
- požadavků na užitné vlastnosti pájeného spoje,
- ekonomických hledisek. [11]

Pájky se dělí zejména dle použité teploty pájení, nejčastěji jsou to slitiny kovů, a rozdělují se na:

měkké pájky – teplota tavení je do $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ - olovo, cín, zinek

tvrdé pájky – teplota tavení je nad $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ - mosaz, bronz

vysokoteplotní pájky – např. slitiny stříbra

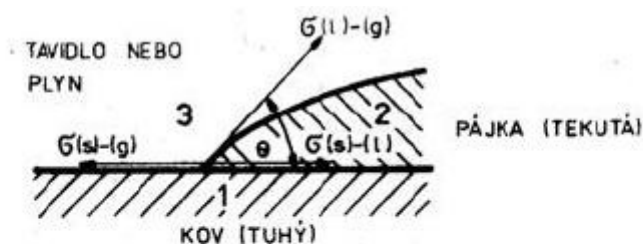
Smáčivost a roztékavost pájky:

Při samotném pájení může roztavená kapka pájky, která se nachází na povrchu základního materiálu, který je ohřán na dostatečně vysokou teplotu, vyvolat následující jevy:

Dokonalá smáčivost – vzniká, když se roztavená kapka pájky roztéká na povrchu základního materiálu jako souvislá tavenina s velmi malým úhlem smáčivosti

Nedokonalá smáčivost – vzniká, když se kapka na základním materiálu neroztéká, ale zůstává na stejném místě a zaujímá zploštělý tvar.

Nesmáčivost – Při silném přehřátí zaujímá kapka nejdříve zploštělý tvar. Při ochlazování dochází ke smršťování kapek do kulovitějšího tvaru, takže úhel smáčivosti se zvětší na 90° nebo na větší než 90° a tímto vznikne nesmáčivost. [2,4]



Obr. 12 Schematické znázornění sil působících při smáčení tuhého kovu roztavenou pájkou
1 - základní materiál; 2 - roztavená pájka; 3 - tavídko, ochranný plyn, vakuum

[4]

Z obrázku výše vyplývá setkání třech napětí v jednom bodě na rozhraní, která se dají určit ve vzájemné souvislosti. Mezi povrchovým napětím a úhlem smáčení existuje následující závislost:

$$\sigma_{(s)-(g)} = \sigma_{(s)-(l)} + \sigma_{(l)-(g)} \cdot \cos \theta$$

V častějším tvaru se uvádí:

$$\sigma_{(s)-(g)} - \sigma_{(s)-(l)} = \sigma_{(l)-(g)} \cdot \cos \theta$$

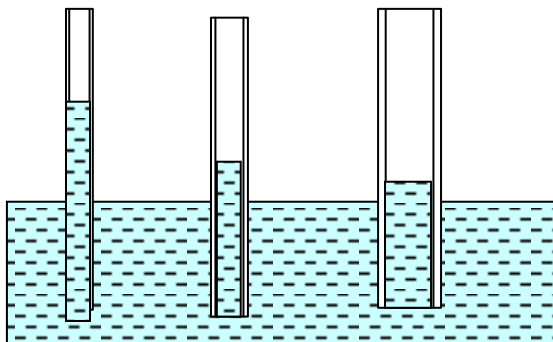
Rozdíl mezi napětím $\sigma_{(s)-(g)} - \sigma_{(s)-(l)}$ bývá také označován jako napětí v přilnavosti.

Kapilarita:

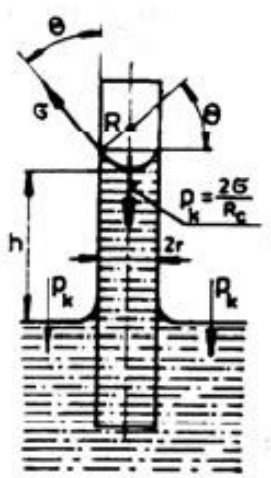
U kapilárního pájení se pájka uloží v blízkosti mezer spoje již při sestavování pájených dílů, pak je pájka spolu s pájenými díly ohřívána na pájecí teplotu, případně se přiloží k mezeře spoje po ohřátí pájených dílů na pájecí teplotu.

V samotném procesu pájení pájka vteče do mezery spoje v důsledku své vztlakovosti (kapilarity). Síla, kterou je samotná pájka vtahována roztavenou pájkou do mezery spoje, je nazývána kapilárním tlakem. Tento tlak závisí na velikosti a uspořádání mezery, kde je důležité, že šířka mezery významně ovlivňuje výšku sloupce pájky.

Kapilaritu taktéž významně ovlivňuje správně nadimenzovaná šířka mezery a čistota pájených ploch. Příliš velká mezera a nečisté plochy mají snižující vliv na velikost kapilárního tlaku. [11,3]



Obr. 13 kapilární účinek při pájení [11]



Obr. 14 kapilární elevace [4]

Je – li kapilarita tvořena dvěma paralelními rovinami s malou mezerou b v m pak

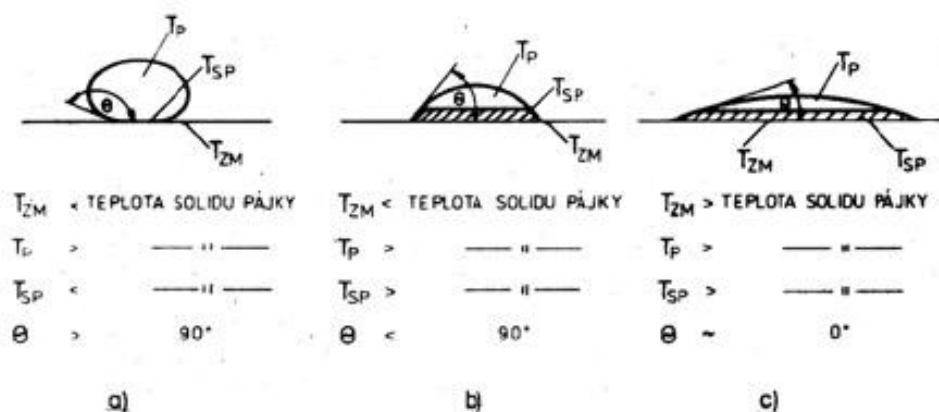
σ_H je adhezní napětí v $N \cdot m^{-1}$

h je výška kapaliny (pájky) ve svislé mezeře v m ,

ρ pájky - je měrná hmotnost pájky v $kg \cdot m^{-3}$ při teplotě pájení,

g – tíhové zrychlení v $m \cdot s^{-2}$

r – poloměr roztavené pájky (menisku) v m .



Obr. 15 Závislost mezi smáčením, spojením a teplotami základního materiálu, pájky a kovově čistým povrchem, a) nesmáčivost – nevznikne spoj; b) smáčení – vznikne spoj; c) dokonalá smáčivost – vznikne spoj; T_p – teplota pájky; T_{SP} – teplota na stykové ploše pájka-základní materiál; T_{ZM} – teplota základního materiálu; θ - úhel smáčení [2]

2.2.4 Tavidla pro pájení

Tavidla se obecně definují jako nekovové, odstraňují oxidy z pájeného povrchu a mají zamezovat jejich nové tvorbě. Kov je potažen vrstvou oxidu, která zamezuje spojení. I když je tato vrstva rozpuštěna, tvoří se, za přítomnosti zahřívání, nová vrstva. Tavidla, ochranné plyny nebo vakuum rozpouštějí oxidy, nebo mohou jejich vzniku zamezit. [11]

Každé tavidlo má danou oblast pracovní teploty, kdy musí být tavidlo aktivní. Rozsah reakční teploty musí být přizpůsoben pracovní teplotě pájky. Důležitou vlastností každého tavidla je nutnost aktivace již pod pracovní teplotou o nejméně (50°C) pod teplotou solidu pájky a zároveň i nad teplotou tání, tedy teplotou likvidu pájky. Na pájená místa se často nanášejí ve formě kapaliny nebo pasty. Zbytky tavidla se po ukončení pájení musí z místa pájení odstranit, jelikož zbytky tavidla mohou mít vliv na vznik koroze spoje. Tavidla se mohou vyskytovat v různých formách, jako ve formě prášku, roztoku, emulze, pasty nebo jako plyn. Podle způsobu pájení se rozdělují na tavidla pro měkké pájení a tavidla pro tvrdé pájení. [2,12]

Tavidla pro měkké pájení:

Pájecí voda – jedná se o roztok chloridu zinku a chloridu amonného s obsahem kyselin, korodující, účinná teplota je 140 °C – 450 °C. Zbytky tavidla musí být omyty vodou.

Pájecí pasta – olej, směs zinko-chloridu a chloridu amonného s organickými tuky ve formě pasty nebo jako kapalná směs, účinná teplota je 200 °C – 400 °C. Zbytky tavidla se umývají ředidlem.

Kalafuna, organická pryskyřice – nekorodující, účinná teplota: 200 °C až 400 °C. Používá se jako prášek nebo v jádru pájecích drátů, zejména v elektrotechnice a elektronice. Zbytky tavidla mohou zůstat na pájeném místě. [2,12]

Tavidla pro tvrdé pájení:

Základní složkou používanou u tavidel pro tvrdé pájení těžkých kovů jsou boritany – krystalický a bezvodý borax, také i kyselina boritá, nebo různé jejich směsi.

Jedním z nejpoužívanějších tavidel, které se v dnešní době používají u tvrdého pájení, je borax.

Borax a roztavený borax jsou používány samostatně jako tavidla. Jejich charakteristickým znakem po ztuhnutí je na povrchu ulpělá, křehká sklovitá látka. Jejich nejčastější použití je v rozmezí teplot od 700 až do 1200 °C.

Tavidla pro tvrdé pájení lehkých kovů musí být silně reaktivní s ohledem na těžkotavitelné oxidy. Obvykle bývají směsí různých chloridů, fluoridů, fluoroboritanů alkalických kovů a kovů alkalických zemin. [2,12]

2.2.5 Teploty při pájení

Teploty jsou u pájení nezbytným doprovodným jevem, na který je nutno brát zřetel. Proces pájení charakterizují tyto teploty:

1. Teplotní interval pájky

Pájky, které se nejčastěji používají k pájení kovů, jsou slitiny ze dvou nebo více chemických prvků, z nichž nejméně jeden je kovový. Teplotním intervalem pájky, se rozumí rozmezí teplot od počátku tavení (teploty solidu) až po konec tavení teploty (likvidu). Existují pájky, které se při překročení solidu taví částečně, nazývají se pájky se širokým intervalem tavení.

2. pracovní teplota

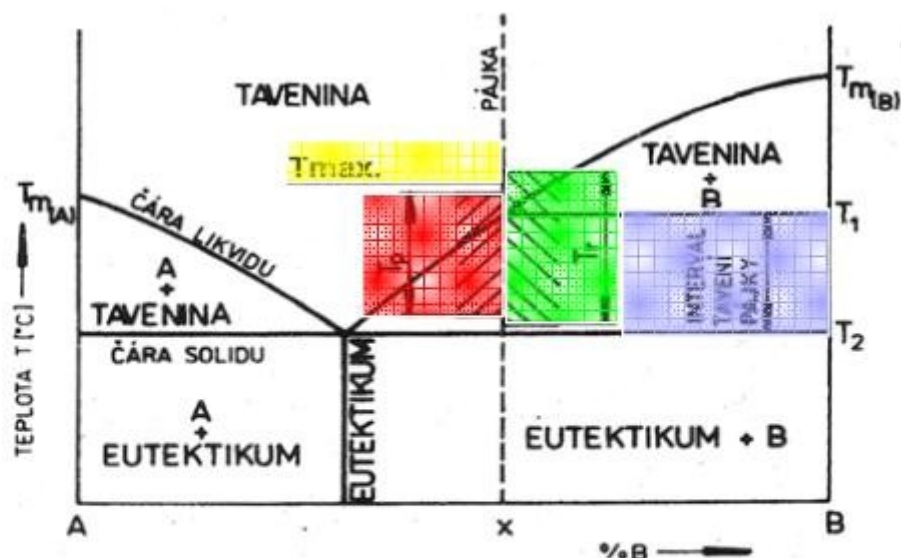
Pracovní teplota (t_{PRAC}) je teplota pájené plochy, potřebná k roztavení pájky a k dosažení smáčivosti, roztékavosti a kapilarity, čímž se dosáhne spojení pájky a základního materiálu.

3. maximální přípustná teplota pájení

Při překročení maximální přípustné teploty u pájení vede ke znehodnocení pájky, tavidla, případně pájeného základního materiálu.

4. reakční teplota

Reakční teplotou se označuje teplotní rozmezí, které uvede do funkce tavidlo, které je schopné odstranit existující oxidické vrstvy a umožní vznik spoje. [4,12]



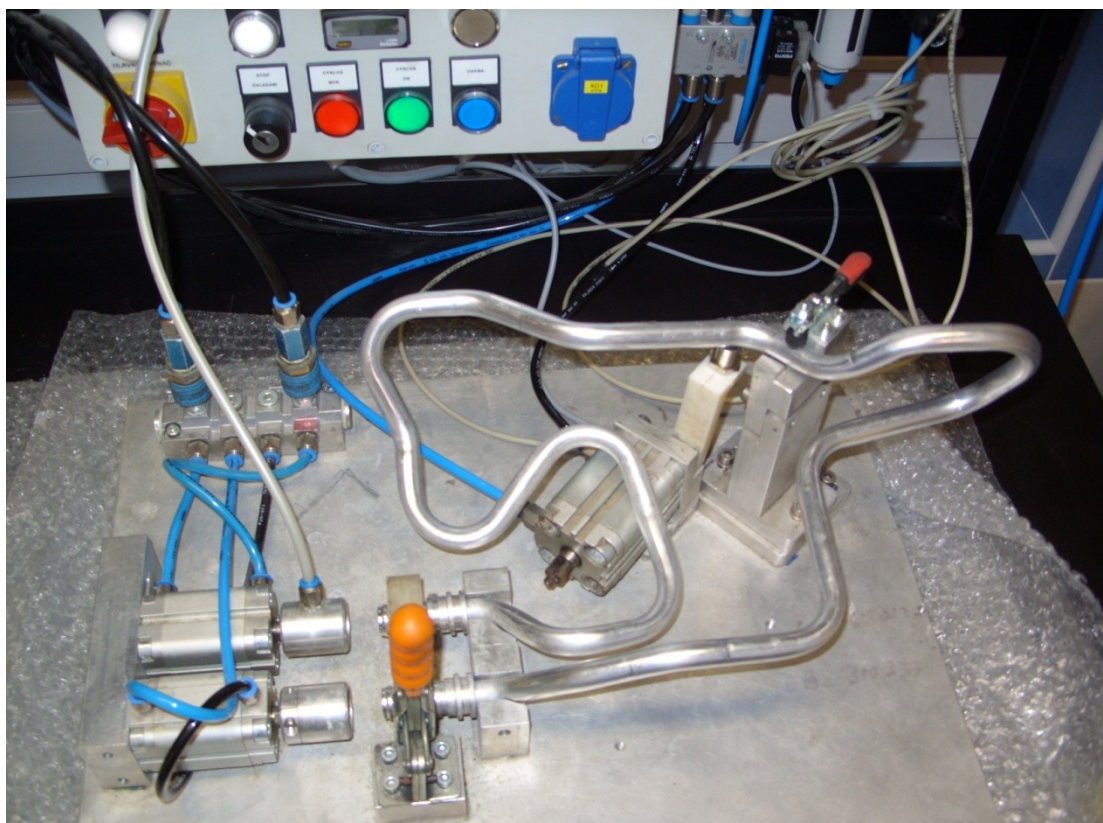
Obr. 16 Rovnovážný fázový diagram slitiny s eutektikem
 $T_{m(A)}$ - teplota tání kovu A; $T_{m(B)}$ - teplota tání kovu B;
 T_1 - teplota likvidu pájky; T_2 - teplota solidu pájky;
 T_p - pracovní teplota; T_r - reakční teplota

[4]

2.3 Kamerový systém a tvarová kontrola

Tvarová kontrola je nedílnou součástí výroby dílů každého podniku, který chce vyrábět spolehlivě a kvalitně. Firma ZKL Hanušovice, a.s. zabezpečuje kontrolu výroby pomocí kamerového systému, který v dnešní době zcela běžně zastává funkci kontroly výroby v automobilovém průmyslu. Systém zpracovává údaje o sledovaném dílu, zdali se nachází na správném místě, v dané oblasti, dále o jeho orientaci, požadovaném tvaru, směru, rozměru. Jednou z výhod je bezdotykové měření, které usnadňuje práci a nachází velké uplatnění v hromadné výrobě, zejména z důvodu deformace některých materiálů.[10]

Inspekce výrobků, je jednou z významných oblastí, kde se lze setkat s využitím kamerových systémů. Pokud srovnáme lidský faktor s kamerovými systémy, dojdeme k závěru, že nedochází k poklesu výkonnosti v důsledku únavy a současně vylučujeme subjektivní vliv operátora. Dalším přínosem strojové kontroly, je regulace rychlosti a možnosti kontroly i více parametrů současně. [10]



Obr. 17 Tlaková zkouška trubky

2.4 Vznik vad a jejich druhy

Pájení, stejně jako svařování, je technologický proces spojování materiálů, kde se nedodržením optimálních podmínek, mohou vznikat vady v pájených spojech. Na vznik vad mohou mít vliv čistota a úprava pájených ploch, výběr kombinace základní materiál – pájka – tavidlo, zajištění polohy spojovaných dílů, tvar a umístění pájky ve spoji, ohřev při pájení, tvar a rozměry pájené plochy, případně vlastnosti tavidla a pájky. K charakteristickým vadám pájených spojů patří např., studený spoj, přehřátí spojovaných materiálů, pájkou nezatečená místa, dutiny a póry, nevyplavené zbytky tavidla, nedostatečně vyplněný spoj, nedokonalý přechod pájky a trhliny. Jednou z hlavních příčin vad pájených spojů, je nesprávně zvolený technologický postup, který ovlivňuje průběh celého procesu pájení.[3,13]

U všech procesů svařování a pájení vznikají problémy, které se týkají v největším zastoupení různých typů necelistvostí. Vady se definují jako nepravidelnosti v pájeném spoji, odchylky od předpokládané relativní polohy částí spojených pájením a odlišují se

od předpokládaného tvaru pájených komponent, pokud tyto odchylky závisejí na pájení. Tyto defekty, které vyskytují u všech druhů svařování a pájení, se dají rozdělit do dvou hlavních skupin a to plošné a objemové vady. Mezi ty plošné se řadí různé typy trhlin, neprůvarů a studených spojů a mezi objemové, různé typy pórů, bublin, kovových i nekovových vměstků, dále nedodržení rozměrů a nepravidelnost povrchu. [2]

2.3.1 Druhy vad [18,13]

Vady se v pájeném spoji mohou vyskytnout jako důsledek špatného materiálu spoje, kde může být příčina v únavě materiálu nebo v mechanickém narušení struktury spoje, kde jsou to zejména různé makroskopické trhliny v pájeném spoji způsobené např. mechanickým namáháním. Důsledkem toho je růst trhlin, který může být ovlivněn např. hrubostí zrna.

Vady jsou klasifikovány šesti skupinami následovně:

I. Skupina – trhliny

Nejčastější příčinou vzniku trhlin je rychlé ochlazování pájeného spoje, v důsledku rozdílného koeficientu tepelné roztažnosti pájky a základního materiálu. Pro vznik trhlin jsou kritické teploty těsně nad teplotou solidu slitiny. Nevhodné konstrukční úpravy způsobující vysokou koncentraci napětí. Trhliny (za tepla) vznikají i při použití houževnaté pájky tehdy, jestliže je pájka, ochlazená pod teplotu solidu.

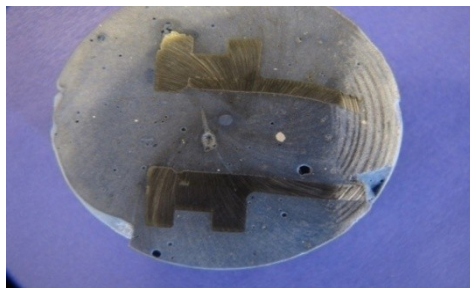
Trhliny za studena vznikají při skončení pájení kolem teploty 200°C a po transformování austenitu na rozpadové struktury při společném působení vodíku, zejména difúzního a tahových napětí vznikajících ve spoji. Objevují se i interkrystalické trhliny, ke kterým patří mikrotrhliny vznikající v důsledku křehkých fází. Trhliny, které se objevují jako podélné, nebo příčné (viz obr. 18).



Obr. 18 Trhlina v příčném řezu trubkou

II. Skupina – dutiny

Dutiny se objevují při smršťování v průběhu tuhnutí pájky. Vznik dutin při pájení je dán rozpustností např. vodíku, který se výrazně rozpouští ve slitinách hliníku. Dutiny se vyskytují jako plynové dutiny, bubliny, plynové kapsy, povrchové póry či povrchové bubliny (viz obr. č 19).



Obr. 19 *Dutiny a póry objevující se v příčném řezu trubkou*

III. Skupina – pevné vměstky

Jedná se o cizorodé kovové nebo nekovové makroskopické částice odlišného vzhledu, struktury a chemického složení než má základní kov. Obvykle vznikají znečištěním taveniny dané slitiny, jejichž zdrojem mohou být produkty oxidace taveniny vzdušným kyslíkem, pomocné látky používané při tavení nebo sloučeniny vznikající během tavení. [5]

Rozdělují se na:

- oxidický vměstek
- vměstek kovu
- vměstek tavidla



Obr. 20 *Makrostruktura výrobku s výskytem velké cizorodé částice nekovového charakteru. [1]*

IV. Skupina – vady spojení

Vady spojení se dají rozdělit na [18]:

- vady spojení – bez spojení nebo nedostatečné spojení mezi pájkou a pájeným materiálem.
- vady vyplnění – neúplně vyplněná mezera
- neúplné zatečení – pájka nezatekla požadovanou délkou ve spoji
- vady spojení – bez spojení nebo nedostatečné spojení mezi pájkou a základním materiálem

V. Skupina – vady tvaru a rozměru

Jedná se o vady, jako jsou:

- nadbytek pájky - kdy se pájka přelila na základní materiál a utuhla jako vlákno
- vadný tvar – odchylka od předepsaného tvaru pájeného spoje
- deformace – nežádoucí změny tvaru pájené konstrukce
- místní natavení – skrz jdoucí díra v pájeném spoji nebo blízko něho
- roztavený povrch základního materiálu – roztavený povrch pájené sestavy v oblasti spoje
- vydutá pájka – povrch pájky v pájeném spoji je menší, než požadovaný rozměr
- nedostatečný koutový spoj – koutový spoj se vytvořil, pod stanovenou velikost
- nepravidelný koutový spoj – měnící se vzhled koutového spoje



Obr. 21 *Deformace – nežádoucí změna tvaru pájené konstrukce*

VI. Skupina – ostatní vady

Do kategorie ostatních vad se řadí vady, které se nemohou klasifikovat ve skupinách a jsou to:

- vytékání tavidla – objevení se zbytků tavidla na povrchových pórech
- rozstřík – kapky pájky ulpělé na povrchu dílce

Změna zbarvení nebo oxidace – oxidace, působení tavidla, usazení par pájky nebo základního materiálu na povrchu

- zbytky tavidla – tavidlo, které se neodstranilo.
- vady se též klasifikují na základě ustanovených předpisů, kde se klasifikují jako:

přípustné – kdy technické normy, technické podmínky, nebo daný smluvní vzorek dovolují jejich existenci a odstranění vady není nutné

nepřípustné – kdy vady ovlivní kvalitu vzorku a neodpovídají stanoveným hodnotám, dále se tyto vady dají rozdělit na opravitelné a neopravitelné. [13,18]



Obr. 22 *Nadměrné přetečení pájky*

2.3.1.1 Způsob zjišťování vad pájených spojů

Vady při pájení lze zjistit vizuální kontrolou nebo posouzením mikrostrukturního výbrusu. Výhodou využití mikrostrukturního šetření, je příprava zkušebních vzorků a možnost kontroly velkých ploch nebo celých polotovarů.[1]

Sledování kvality povrchu materiálu se provádí zejména vizuální kontrolou, někdy za pomoci lupy se zvětšením až šestinásobným, případně se používá stereolupa se zvětšením 3 až 50x. Použití stereolupy, je vhodné zejména na makrostrukturální pozorování nekovových vměstků, velkých hrubých fází, nerozpuštěných částic legur, makroporezity, jemných strukturálních nehomogenit a dále k měření hrubozrnných okrajových vrstev. [1]

Vnější vady v pájených spojih zahrnují:

Nedoplnění pájkou, trhliny, pórovitost vystupující na povrch, neúplné zaplnění spoje (viz obr. č 23), přesah, místní natavení, hrubý povrch spoje, vytékání tavidla, změna barvy, rozstřík, zbytky tavidla, povrchová eroze základního materiálu. [13]



Obr. 23 *Neúplné zatečení pájky (nedopájená koncovka)*



Obr. 24 *Rýha na povrchu materiálu*

2.3.1.2 Vady zjistitelné na mikrostruktúře

Vnitřní vady, jsou vady, které zjišťujeme při makrostrukturálním šetření a řadíme mezi ně vnitřní trhliny, vady zaplnění pájkou, pevné vměstky, zachycení plynů, vměstky tavidla, nedostatečné roztavení a nadměrná tvorba slitiny pájky a základního materiálu, někdy zvaná eroze. [1]

Vměstky:

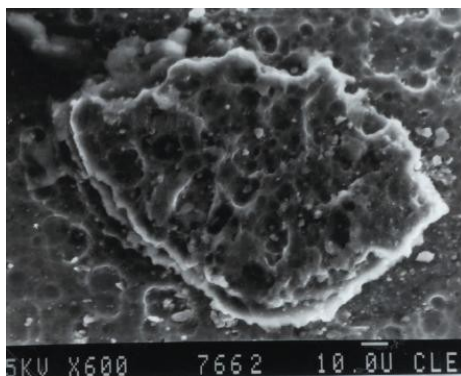
Vměstky jsou cizorodé částice nerozpustné v hliníku, které jsou zjistitelné na mikrostruktúře, za vměstky se tyto částice považují od velikosti několika mikrometrů až po několik milimetrů. Podle příčiny vzniku, se rozdělují na exogenní, tedy takové, které se do kovu dostávají z vnějšku, a endogenní, vnitřní, které v kovu vznikají v důsledku metalurgických reakcí během tuhnutí. Všechny tyto vměstky jsou nepřipustné a snižují kvalitu materiálu. [1,13]

Oxidické vměstky

Oxidické vměstky jsou cizorodé částice, nerozpustné v hliníku, ke kterým patří např. oxidické částice kovů nebo nekovových prvků. Jejich původ lze přičíst nedostatečné přípravě pájených ploch nebo zanesením do místa pájení před nebo v průběhu pájení. Jejich přítomnost v materiálu souvisí s nedostatečnou přípravou technologie, nebo nedostatečnou přípravou pájených ploch. [1,13]

Kovové vměstky

Jedná se o méně častou skupinu vměstků. Jsou to obvykle nerozpuštěné kovové přísady. Nedokonalé rozpouštění je zapříčiněno kovovou přísadou, která se obalí vrstvou strusky.[1]



Obr. 25 Oxidická částice z elektronového rastrovacího mikroskopu AlCuMgPb [1]

2.3.2 Doprovodné jevy při vzniku vad

Při tavných procesech spojování hliníku, doprovází vznik vad mnoho faktorů, které je třeba zohlednit. Svařitelnost i pájitelnost hliníku ovlivňuje mnoho činitelů, které vyžadují odlišný přístup k svařování a pájení ve srovnání se spoji ocelových materiálů.

Mezi nejdůležitější činitele ovlivňující proces pájení hliníku patří:

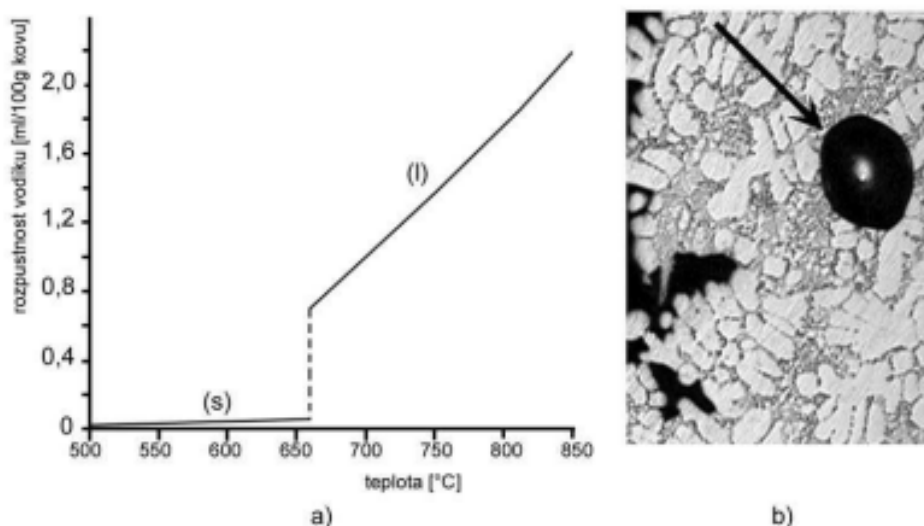
1. Velká afinita hliníku ke kyslíku

Tento jev způsobuje tvorbu oxidické vrstvy Al_2O_3 , která zabráňuje metalickému spojení základního a přídavného materiálu a je nutno ji před započetím pájení odstraňovat.

Oxidická vrstva, která se vytvoří na povrchu, má tloušťku 0,01 μm . Velký vliv na její velikost má účinek vyšší teploty a vlhkosti, kde se tato vrstva může zvětšit na tloušťku 0,03 až 0,1 μm . Oxidická vrstva se sice podílí na vytvoření ochrany materiálu před další oxidací, která zajišťuje odolnost hliníku vůči korozi v některých prostředích, ale má vlastnosti, které negativně ovlivňují schopnost vytvoření spoje. Především vysoká teplotní stabilita oxidu hliníku (kolem 2050 °C) vzhledem k základnímu materiálu (teplota tavení hliníku je kolem 660 °C) a nerozpustnost v roztaveném kovu, z níž vyplývají problémy při vzniku spoje.[2,5]

2. Difúze Vodíku

Vodík patří mezi plyn, který významným způsobem ovlivňuje kvalitu spojení během tavení. Během procesu, kdy se materiály taví, je kov obklopený atmosférou s určitou vlhkostí. Vodík je jediným plynem, který má v hliníku významnou rozpustnost. Rozpustnost se zvyšuje s rostoucí teplotou v rozmezí přibližně 650 °C až 870 °C. Slitiny hliníku jsou charakteristické rozdílem rozpustnosti v tuhém a tekutém stavu. Důležitým faktorem ovlivňujícím vznik plynových dutin ve slitinách hliníku je snížení rozpustnosti vodíku. Skutečné množství plynu, které je roztaveno v kovové lázni, může být menší, než je jeho rovnovážný obsah. V tomto případě se ovšem musí použít způsoby tavení, které omezují kontakt taveniny s vnějším vlivem vlhkosti. Opačným způsobem může dojít ke zvýšení obsahu vodíku, než je dáno rozpustností, potom už dochází k vylučování plynu difúzí nebo vytvářením bublin.[2,5]



Obr. 26 a) Charakteristika rozpustnosti vodíku na teplotě Al

b) vodíková bublina (označena šipkou) v odlitku ze slitiny AlSi10 [5]

3. Alternativní možnosti pájení dílů výměníků v praxi

3.1 Pájení průběžnou pecí v ochranné atmosféře

Mezi základní vybavení dílen tepelného zpracování můžeme zařadit ohřívací pece, v nichž se zpracovávané výrobky ohřejí na požadovanou teplotu a dále zpracovávají. Pájení průběžnou pecí v ochranné atmosféře patří mezi moderní technologie pájení. Využívá se především u výrobků, kde jsou kladeny vyšší nároky na zpracování.

Mezi nejznámější výrobce průběžných pecí patří italská firma Scame, která vyrábí širokou škálu průmyslových zařízení ke zpracování kovů, nerezové oceli a ušlechtilých kovů.

- Průběžná pájecí pec SCAME BRAZING LINE

Jde o druh pece, která nachází své uplatnění v oblastech jako je žihání, či tvrdé pájení kovových dílců. Tento typ konstrukční řady se vyznačuje zpracováním dílců pod ochrannou atmosférou. Plyn se získává v integrovaném generátoru z metanu, případně propanu. [15]

Zařízení je vybaveno počítačovým systémem kontroly a dohledu. Stroj pracuje se softwarovým systémem „Winscane“, který umožňuje plnou kontrolu funkcí pece a sledování procesu. Jednotlivé procesy je možné programovat a opakovat. Jednotlivá zařízení mohou být

nadále vybavena dalšími příslušenstvím, kde nalezneme přídatný agregát pro případný výpadek, uzavřený okruh pro chlazení vody nebo interní měření chladicí křivky. Zařízení využívá elektrické topení s maximální teplotou 1150°C. Pec lze též v některých případech vybavit komorou pro předehřev, která je ohřívána teplem ochranné atmosféry. [15]



Obr. 27 Tepelně zpracované produkty pece BRAZING LINE [15]

- Průběžná pájecí pec SCAME ALUBRAZING LINE (Řada 1000)

ALUBRAZING LINE patří mezi vývojově nejmladší typ zařízení, které vzniklo ze zvláštní potřeby zákazníků v oblasti zpracování hliníku. Jedná se o speciální pájecí pece pro hliníkové díly, které jsou pájeny hliníkovo-silikonovými prostředky. Zařízení je konstruováno tak, aby umožňovalo teplotní jednotnost a míchání různých druhů atmosfér, v závislosti na zpracovávaných dílech.

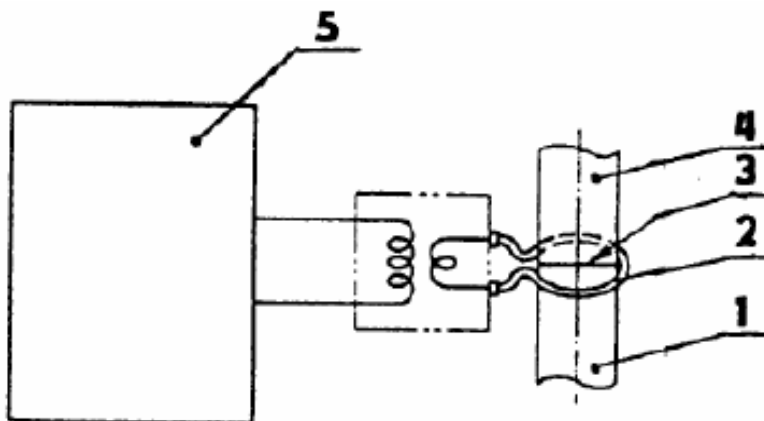
Všechny typy zařízení, jsou vybaveny automaticky řídicím a kontrolním systémem. V momentu nalezení ideálního procesu pro zpracování určitého produktu, lze tento proces uložit a nadále jej využívat jako program. [15]



Obr. 28 Pájecí průběžná pec Scame [15]

3.2 Pájení indukčním ohřevem [16]

Při Indukčním pájení vzniká teplo elektromagnetickou indukcí, díky které je umožněn bezdotykový elektrický ohřev součásti na teplotu pájení. Ohřev se provádí pomalu, za účelem dosažení rovnoměrného ohřevu celého průřezu pájeného spoje. V místech spojů se snažíme dosáhnout rovnoměrného ohřevu obou součástí na teplotu pájení.



1. Pájený materiál, 2. Induktor, 3. Pájený spoj, 4. Pájený materiál, 5. Generátor

Obr. 29 Indukční tvrdé pájení[14]

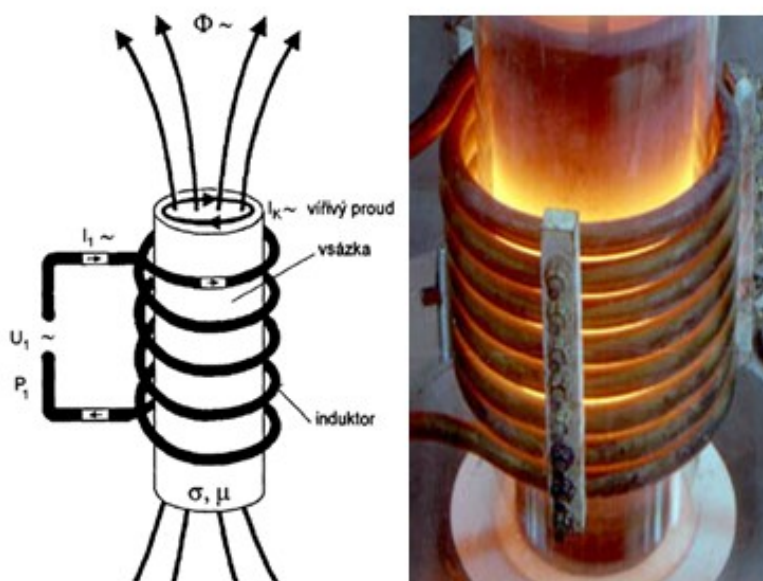
Indukční ohřev je souborem vlastností, kdy elektricky vodivý materiál lze ohřívat elektrickým proudem, který se v něm indukuje elektromagnetickým polem. V podstatě pracuje na principu transformátoru, kde primární vinutí tvoří induktor, jímž protéká primární proud. Materiál, který ohříváme, vytváří sekundární vinutí s jedním závitem spojeným nakrátko. Při indukčním ohřevu nemagnetických kovů, jako (Cu, Al), je ohřev pomalejší, jelikož ho provádí pouze vířivé proudy.

Indukční ohřev se vyznačuje mnohými výhodami, mezi ty nejdůležitější patří:

- Řízení intenzity ohřevu a rozložení teploty
- Povrch pájeného materiálu není ohrožen chemickými reakcemi jako u ohřevu plamenem
- Indukční pájení zamezuje uvolňování produktů spalování, které vznikají u pájení plamenem

Frekvence [Hz]	Hloubka vniku [mm]					
	Cu		Al		Ocel	
	20 °C	1 100 °C	20 °C	660 °C	20 °C	800 °C
50	9,5	31,8	12,2	31,5	8,0	71,2
1 000	2,1	7,1	2,7	7,0	1,8	15,9
10 000	0,67	2,25	0,86	2,2	0,56	5,0
1 000 000	0,067	0,22	0,086	0,22	0,056	0,5

Obr. 30 Rozdělení hloubky vniku frekvence u vybraných materiálů [16]



Obr. 31 Indukční pájecí pec [16]

4. Návrh nové technologie a provedení experimentu pájení výměníků

Návrh nové technologie byl řešen z důvodu zvyšujícího se počtu vad pájených spojů. V mnoha dílech, které byly zhotoveny pájením plamenem, se vyskytoval problém se vznikem bublin, mikroskopických trhlin ve spoji, mezi koncovkou a s ní spájenou trubicí. Bylo nutno odstranit vzniklé problémy a zabezpečit požadovanou kvalitu výroby. Jednou z hlavních

příčin vzniku těchto vad bylo použití pouze čtyř hořáků, rozmístěných po dvou, na obou stranách přípravku u pájené trubky, tím nedocházelo k rovnoměrnému ohřevu dané součásti a vlivem tohoto nedostatku neproběhlo dokonalé zatečení pájecího kroužku do spoje. Konečným důsledkem tohoto problému byl vznik vnitřních a vnějších vad ve spoji. Další částí návrhu nové technologie byla realizace experimentu alternativní možnosti pájením indukčním ohřevem, kde se aplikoval jiný přístup k problematice vzniku vad v pájeném spoji a hledal se optimální časový úsek pájení, vhodný výkon, čas a napětí pájení, pro dosažení požadující kvality spoje, provedením několika experimentů.

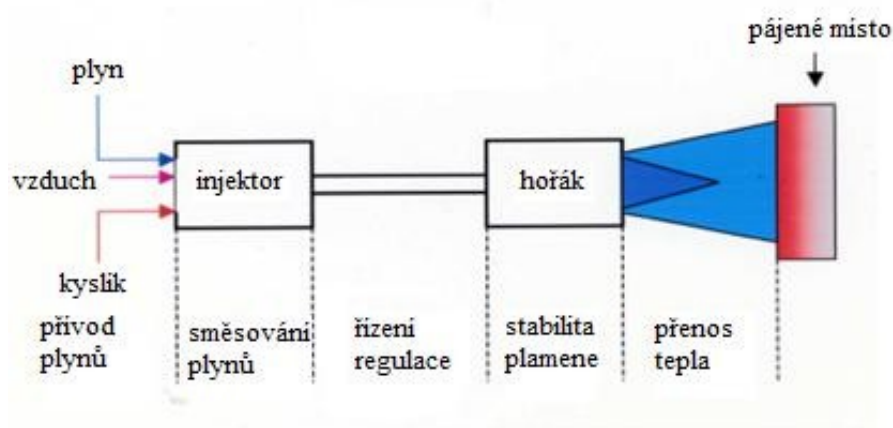
4.1 Stávající technologie pájení výměníků

4.1.1 Pájení plamenem [14]

Pájení plamenem patří k tradičním způsobům spojování dílců. V oblasti pájení tepelných výměníků patří k hojně využívaným metodám spojování. Pájení plamenem využívá tepla spalováním hořlavého plynu. Ve směsi s kyslíkem je nejčastěji používaným plynem, propan, butan, zemní plyn.

Místo spoje se ohřívá energií spalovaného hořlavého plynu se vzduchem nebo kyslíkem. Podstatou pájení plamenem, je vtažení roztaveného přídavného materiálu vlivem kapilarity mezi těsně přiléhající spojované plochy.

Pájení plamenem je vhodné pro opravy, údržbu, montáž zejména při kusové výrobě tvarově rozměrnějších dílů. V těchto případech se často volí ruční způsob pájení. Výhody pájení plamenem oproti jiným používaným metodám, spočívají v nízkých investičních nákladech na pájecí zařízení a příslušenství. K zamezení ztrát energie vyzařováním a vedením tepla při pájení plamenem, je nutno provádět ohřev rychle a rovnoměrně za použití nejlépe několika hořáků. Při nerovnoměrném ohřevu, nastane důsledkem vysokého součinitele tepelné roztažnosti hliníku zmenšení mezery spoje. Lze tomu zabránit buď pevným upnutím dílů, nebo se provede úprava spojů v ohřátém stavu tak, aby vznikla při pájení optimální mezera kolem 0,1mm. Pracovní postup strojního pájení plamenem závisí na typu spoje. Díly jsou důkladně očištěny a připraveny k upnutí v přípravku. Ohřev je zajištěn čtyřmi hořáky umístěnými vzájemně vůči sobě, aby došlo k rovnoměrnému zahřátí celé pájené oblasti.



Proces pájení plamenem

Obr. 32 *Procesy při pájení plamenem*



Obr. 33 *Pájení spojů plamenem*

4.1.2 Používané strojní zařízení

Stroj s otočným pracovním strojem typu „Karusel“ 8pozicový stroj typu **TA3790ER-B**

Jde o strojní pájecí zařízení, které je využíváno pro pájení tvarově a prostorově méně náročných dílů, kde se počítá s vysokými požadavky na výkonnost stroje. Takt stroje je programovatelný, který se pohybuje v rozmezí 12 až 60 sekund, kde se jeho teoretická hodinová výrobní kapacita pohybuje v rozmezí 60 až 300 ks zapájených výrobků.

Stroje jsou vždy navrhovány se sudým počtem pracovních pozic, z důvodu vysoce přesného technického řešení vačkového mechanismu pohonu, polohování otočného stolu. [16]. Stroj je vybaven možností vlastního řízení ohřevu a pájecího procesu, kde se nejčastěji nasazuje podavač nebo CCD kamera, v pozicích předehřevu je proces řízen časovači. Zařízení je taktéž vybaveno integrovaným okruhem vodního chlazení.

Uspořádání pracovních pozic stroje:

1. pozice – ruční odebrání zapájených výrobků, zakládání nových dílů pro pájení (pracoviště obsluhy)
2. pozice - automatické dávkování tavidla
3. pozice – předehřev
4. pozice – předehřev
5. pozice – pájení
6. pozice – chlazení vzduchem
7. pozice - chlazení vodní sprchou
8. pozice – volná pozice (připravená jako pracoviště druhé obsluhy)



Obr. 34 Pájecí stroj TA3790ER-B [17]

Jednou z nesporných výhod těchto strojních zařízení, je kromě klasického řízení pájecího procesu časem nebo teplotou, vybavení strojů automatickým podavačem drátu nebo CCD kamerou.

Jednotlivé popisy řízení pájecího procesu:

- řízení časem – přísun tepla do procesu je modulován podle přeprogramovaného scénáře (časové osy), kdy jsou jednotlivé kroky ohřevu po sobě jdoucí v přesně definovaných časech, stroj tedy flexibilně nereaguje na podmínky, které se mění během procesu
- řízení teplotou – teplota snímaná bezdotykovým způsobem, je vyhodnocována a stává se řídicím signálem, který bude mít zásadní vliv na přísunu tepla do procesu
- řízení inteligentním podavačem pájecího drátu – tento typ řízení je dán unikátním řešením podavače, kdy se samotný pájecí drát stává čidlem, určujícím, nikoliv však měřícím, teplotu v pájeném místě
- řízení CCD kamerou – časové změny digitalizovaného obrazu pájeného místa, jsou automaticky detekovány, následně se vyhodnocují a stávají zásadním a přesným řídicím signálem, který určuje průběh přísunu tepla do procesu [17]



Obr. 35 Pracovní pozice stroje

4.1.3 Pracovní postup a příprava pájených spojů

Pracovní postup ručního pájení plamenem i u dalších metod pájení závisí na typu spoje, který se bude provádět. Vzorky jsou upraveny ze všech stran trubky, které přijdou do styku s pájkou. K vytvoření kvalitní spoje musí být splněny tyto požadavky, po kterých následuje samotné pájení. [11]

Předúprava pájených spojů [11]

Plochy spojů před započítím procesu pájení musí být náležitě připraveny, zbaveny nečistot a připraveny též velikosti spár. Zejména vrstvy mastnot a oxidů zabraňují spojení pájky s kovovými plochami. Důležité je nezapomenout se pájeného místa nedotýkat prsty.

Zahřívání podporuje vznik oxidů, účelem tavidel je rozpouštět vzniklé oxidy a během procesu zahřívání zamezit tvorbě nových.

Součásti a pájka musí mít při pájení požadovanou pracovní teplotu. Jde o teplotu, která je nejnižší povrchovou teplotou v místě pájení, při které se pájka taví a může difundovat do základního materiálu

Účinná teplota tavení pájky a tavidla spolu musí být sladěny.

Pracovní postup pájení: [11]

1. Příprava pájeného spoje

Pájka je schopná se udržet jen na kovově čistém povrchu. K očištění povrchu, který se bude pájet, se používá pilníků, škrabek nebo pájeného kartáče, pozinkované plechy se čistí mořením, respektive potřením spoje zředěnou kyselinou solnou. Jednou z důležitých vlastností spoje jsou mechanické vlastnosti. Pevnost spoje ovlivňuje velikost spáry mezi pájenými dílci, kdy platí, že čím menší spára, tím je spoj pevnější. Pájené spoje se před pájením zafixují vůči sobě kleštěmi ve svěráku, případně pomocí speciálních přípravků na upnutí dílců.

2. Aplikace tavidla před pájením

Před nanesením pájky je nutné, aby součásti byly nahřáty na tavící teplotu pájky a na této době udržovány po celou dobu pájení. Před pájením nanese na pájený povrch tavidlo (pájecí pasta, kalafuna, pájecí voda, borax). Tavidla zabraňují přístupu kyslíku k pájenému místu a odstraňují zbytky nečistot.

3. Pájení

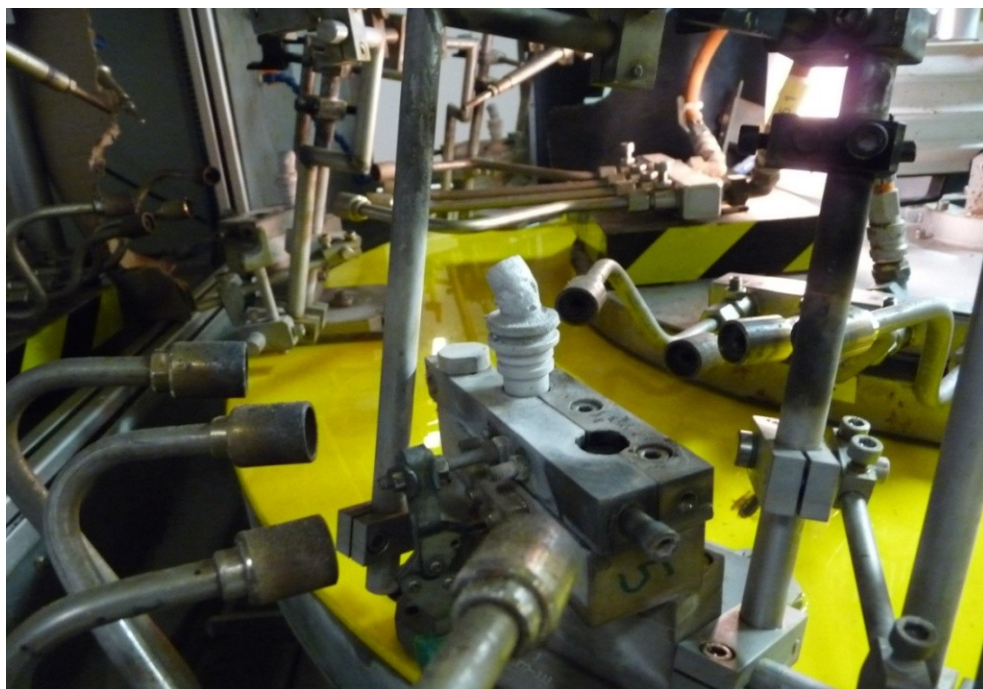
Po nanesení potřebného množství pájky dochází k zatékání roztavené pájky mezi těsně spojené součásti, kdy je pájka nasávána kapilárním účinkem viz obr 13. Mezi roztavenou pájkou a neroztavenými povrchy dílců, dochází k difuzním pochodům, které mají vliv na celkové vlastnosti pájených spojů. Spára mezi dílci má být co nejmenší, doporučená hodnota se pohybuje mezi (0,05 až 0,2 mm).

4. Očištění pájeného spoje

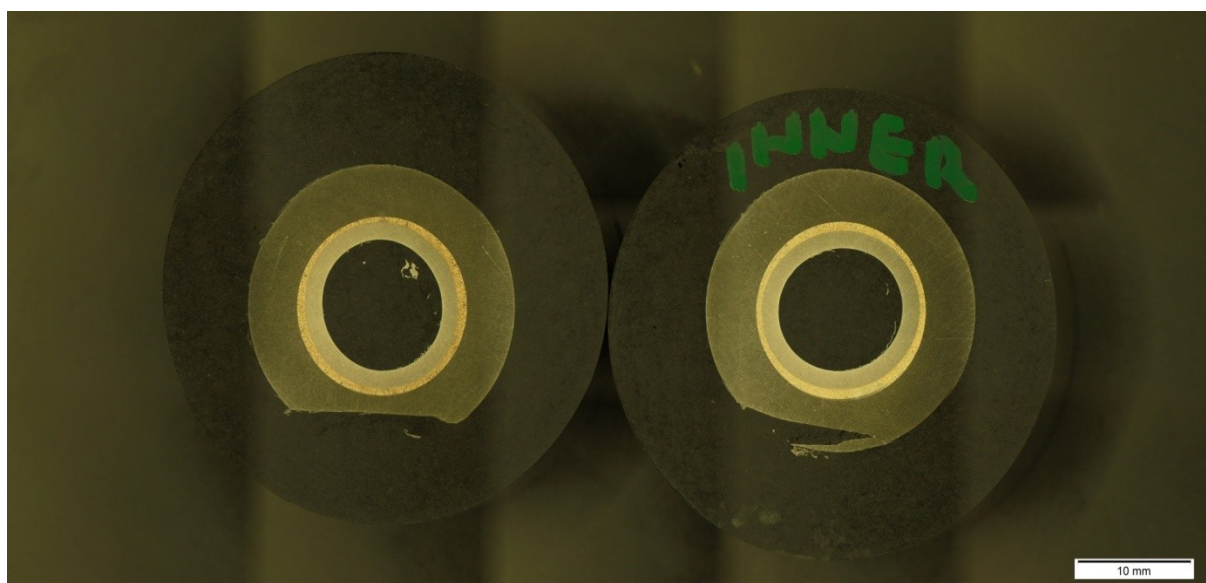
Po očištění pájení je nutné povrch součásti očistit od zbytků tavidel a čisticích prostředků, zejména v případě, kdy byla jako tavidla použita pájecí voda.

4.2 Návrh nové technologie pájení výměníků plamenem

Nedostatečné zajištění procesu pájení celkem čtyřmi hořáky, které byly rozmístěny po stranách přípravku, kde na každé straně se nacházely jen dva hořáky, bylo nutné vyřešit a navrhnout případné rychlé řešení problému. Nejvhodnějším a nejúčinnějším řešením bylo zrealizovat ohřev, přidáním dalších čtyř hořáků po stranách přípravku, které byly rozmístěny takovým způsobem, aby bylo dosaženo kvalitního zatavení pájky do koncovky a vytvořil se tak vyhovující spoj. Nezbytným faktorem, který značně ovlivňoval výsledek pájení, byl přehřev přípravku, bylo nutné zajistit dosažení správné teploty přehřevu přípravku, než se postupně postoupilo k samotnému pájení. Pomocí řízení vlastního ohřevu a pájecího procesu CCD kamerou a časovači, se zajistil přesný časový sled jednotlivých operací. Nespornou výhodou CCD kamer je jejich automatizace nastavení citlivosti snímání podle požadavků obsluhy. Realizace těchto opatření zajistila rovnoměrný ohřev součástí a zefektivnila sériovou výrobu pájení tepelných výměníků plamenem.



Obr. 36 realizace nové technologie přidáním hořáků



Obr. 37 Vyhodnocení trubky pájené plamenem po úpravě technologie pájení

4.3 Provedení experimentu pájení indukčním ohřevem

Provedení experimentu pájení hliníkové trubky indukčním ohřevem bylo uskutečněno ve firmě ZEZ Praha k datu 13. 4. 2012, na zařízení vyrobeném ve stejnojmenné firmě k účelům provádění experimentů indukčního pájení.

Požadavkem experimentu bylo dosažení vyhovujícího spoje trubky s označením 0B2 300 333A (chemické složení a mechanické vlastnosti trubky viz tab. 1 a 2), pomocí indukčního ohřevu, kde jako pájka byl použit pájecí kroužek s ID14 tloušťky 2 mm (tab. 5 a 6), jako tavidlo bylo zvoleno tavidlo AFP 200 firinit, základní materiál AlMn1 AW 6062 (tab. 3 a 4). V jednom případě zkoušky byla použita pájecí pasta Fusion.



Obr. 38 Testovací zařízení instalované ve firmě ZEZ Praha s.r.o.

4.3.1 Zkoušky provedené pájením indukčním ohřevem

Před započítím samotného experimentu, bylo třeba vytvořit podkladovou základní plochu pro uskutečnění experimentu. Základní vrstvu podkladu tvořila sestava cihel, na kterou byl posléze položen pórobetonový (ytongový) kvádr, na tento kvádr se připevnili keramické trubičky, do kterých byla vložena pájená koncovka. Poté byla provedena aplikace tavidla s pájecím kroužkem, po které následovalo vložení trubky a indukčním ohřevem samotné pájení.



Obr. 39 *Průběh pájení indukčním ohřevem*

Během experimentu bylo provedeno celkem šestnáct zkoušek pájení pomocí indukčního ohřevu, kde každá zkouška byla provedena s různými parametry. Cílem bylo dosáhnout optimální kombinace všech parametrů k vytvoření nejlepšího výsledného spoje. Mezi parametry ovlivňující celkový výsledek byly, celková doba pájení, napětí uváděné v procentech a následně výkon uváděný v kilowatech. V tabulce 7 a 8 jsou zaznamenány jednotlivé parametry zkoušek a jednotlivé výsledky. Obrázky 40 až 47 znázorňují výběr jednotlivých zkoušek provedených zvolenými parametry pájení

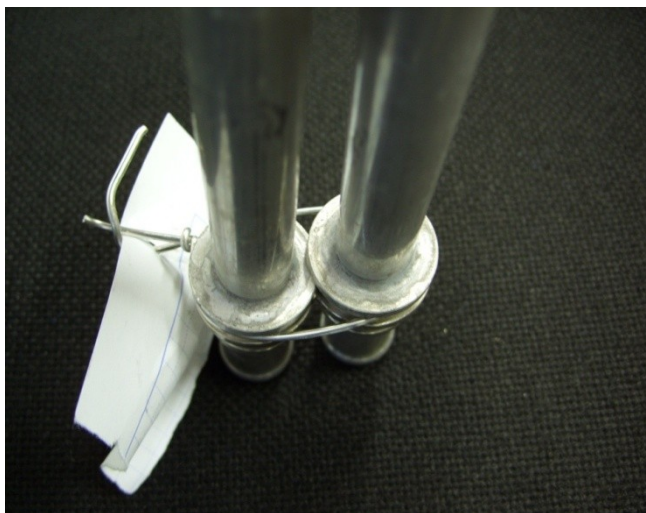
Zkouška č. 1 a č. 2: stanovení parametrů na koncovkách bez trubek s tavidlem a pájecím kroužkem



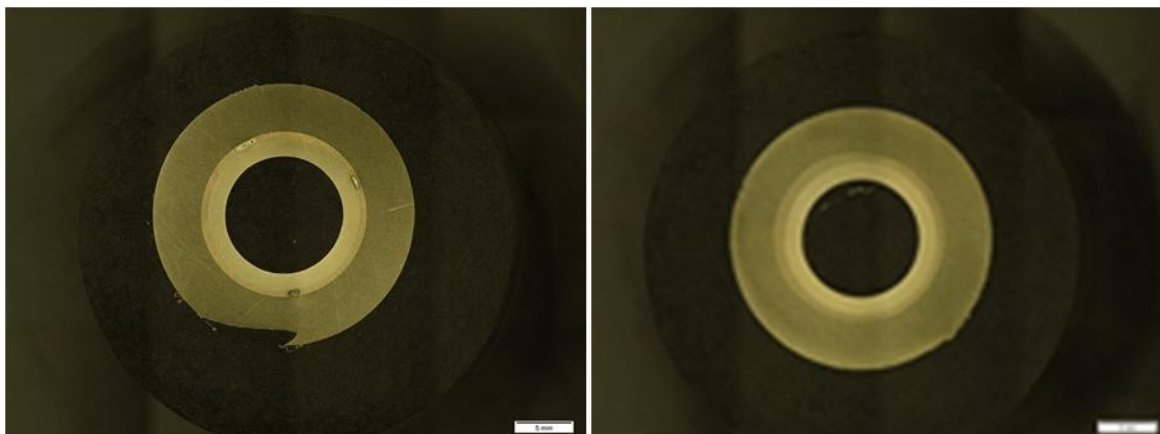
Obr. 40 *Zkouška č. 1, čas 1 min. 8 sec; napětí 15% (2,4 kW)*

Zkouška č. 2, čas 48 sec., napětí 18% (3,2kW)

Zkouška č. 4: Zkouška byla provedena s vložením hladké rovné trubky, bez tvarových úprav a ohybů. Výsledek pokusu vypadá z vnějšího pohledu jako vyhovující. Na obrázku 41 vidíme výsledek tohoto pokusu v řezu.



Obr. 41 Zkouška č. 4, čas 2 min. 10 sec; napětí 15% (2,2 - 2,4 kW)



Obr. 42 Vyhodnocení zkoušky č. 4

Zkouška č. 12: Zkouška byla provedena již s trubkou, tvarově upravenou s požadovanými ohyby. Z obrázku lze vyvodit, že tvar trubek (vnitřní i vnější) mají vliv na výsledek experimentu, kde lze vidět jednu část trubky zapájenou s koncovkou a na další části je již částečně roztavená i samotná koncovka.



Obr. 43 Zkouška č. 12, čas 1 min. 18 sec; napětí 18% (3,4 - 3,5 kW)

Zkouška č. 13 : Zkouška byla provedena s tvarově upravenou trubkou, kde byla použita pájecí pasta FUSION, na obrázku 44 vidíme, že k požadovanému zapájení pájecího kroužku do koncovky nedošlo, ale došlo k výrazné deformaci koncovky a na povrchu koncovky se vytvořily nežádoucí bubliny.



Obr. 44 Zkouška č. 13, čas 1 min. 17 sec; napětí 18% (3,4 - 3,5 kW)

Zkouška č. 16A+16B: Poslední zkouška byla provedena odlišným způsobem od předcházejících, rozdíl byl v způsobu založení, který je vidět na obrázku 45, kde se v induktoru zapájela nejprve jedna část trubky s koncovkou, kterou po skončení pájení následovala část druhá. Neproběhlo tedy pájení obou částí současně. Ve výsledku se jednalo o vytvoření vyhovujícího spoje a tento způsob indukčního pájení se jevil jako nejvhodnější.

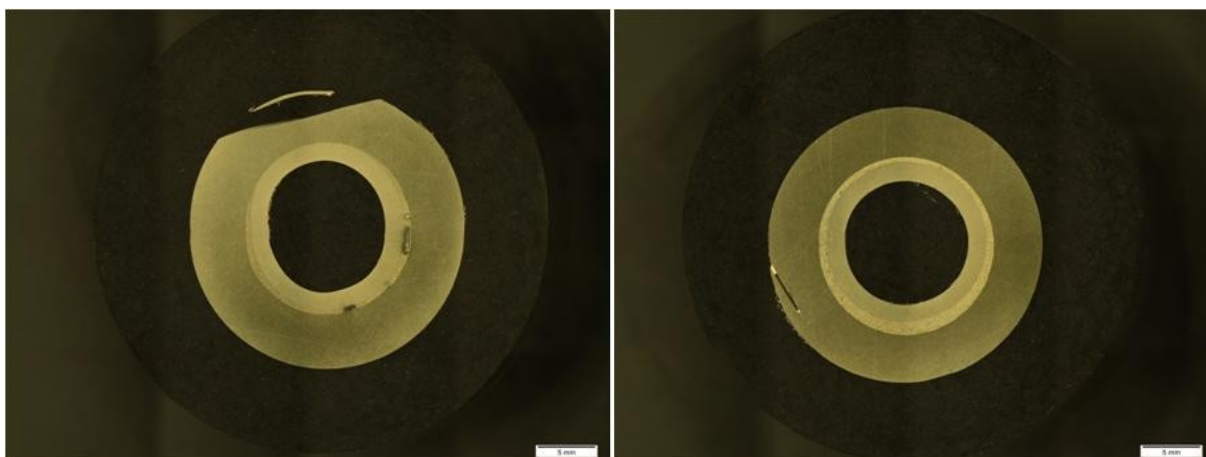


Obr. 45 Zkouška č. 16A+16B, způsob založení



Obr. 46 Zkouška č. 16A vnitřní, čas 1 min. 3 sec; napětí 20% (kW)

Zkouška č. 16B vnitřní, čas 1 min. 6 sec., napětí 20% (kW)



Obr. 47 Vyhodnocení zkoušky č. 16

Tab. 7 Tabulka s parametry a výsledky popisujícími jednotlivé zkoušky.

číslo pokusu	1	2	3	4	5	6	7	8		9	
čas pájení (sec)	68	48	50	130	68	69	72	60	14	60	20
napětí (%)	15	18	20	15	18	18	18	18	15	18	15
výkon (kW)	2,4	3,2	3,2 - 3,7	2,2 - 2,4	3,4 - 3,5	3,4 - 3,5	3,4 - 3,5	3,3 - 3,5	3,4 - 3,5	3,4 - 3,5	3,4 - 3,5
výsledek	nespojeno - nahřátá koncovka s pastou	spojeno - vyhovující	nespojeno - pájka zůstala na koncovce	nedopájeno	spojeno	spojeno	spáleno	nedopájeno	spojeno	nedopájeno	spáleno

Tab. 8 Tabulka s parametry a výsledky popisujícími jednotlivé zkoušky.

číslo pokusu	10		11		12	13 - pájecí pasta FUSION	14	15 - zkouška konce trubky	16A	16B
čas pájení (sec)	60	12	60	4	78	77	58	77	63	66
napětí (%)	18	13	18	13	18	18	20	20	20	20
výkon (kW)	3,4 - 3,5	3,4 - 3,5	3,4 - 3,5	3,4 - 3,5	3,4 - 3,5	3,4 - 3,5	3,5 - 3,9			
výsledek	nedopájeno	spojeno	nedopájeno	spojeno	nespojeno - natavená koncovka	spáleno - neroztavená pasta	nespojeno	spáleno	spojeno - vyhovující	spojeno - vyhovující

4.3.2 Vyhodnocení experimentu indukčního pájení

Po provedení experimentu indukčního pájení dílců, se došlo k závěrům, ze kterých lze vyvodit podmínky pro vhodnost použití indukčního pájení na výrobu pájených spojů tepelných výměníků.

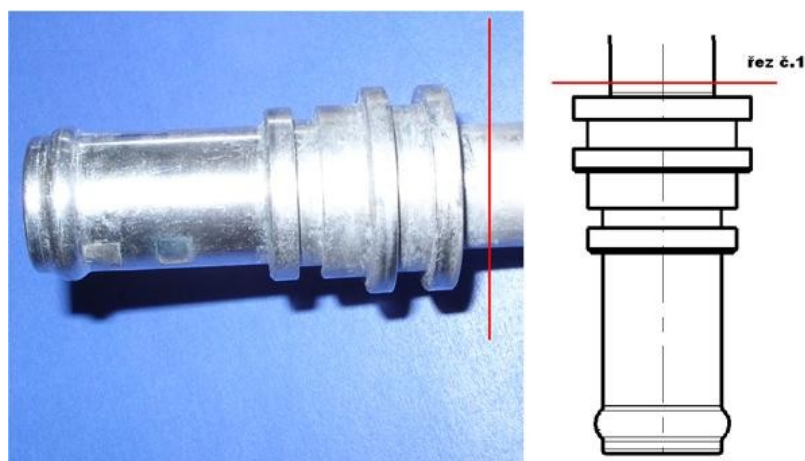
- jedním z důležitých faktorů je, že při zavedení indukčního pájení do sériové výroby, je nutné pájet každou koncovku zvlášť, tedy nezávisle na sobě, za účelem dosažení vyhovujícího spoje.
- použitý induktor, zejména jeho tvar, má zásadní vliv na kvalitu výsledného spájeného spoje.
- tvar trubek (vnitřní i vnější), které jsou vsunuty do koncovek, mají celkový vliv na průběh celého procesu pájení.
- materiály, které se budou používat v pájení, musejí být nevodivé, aby neovlivňovali průběh indukčního pájení.
- chlazení dílu, musí být provedeno až po vyjmutí dílu
- ohřev pomocí indukce je stabilní, za předpokladu dodržení všech podmínek, které je nutno dodržovat u pájení plamenem, jako čistota prostředí, množství tavidla, způsob a přesnost zakládání dílů, teplotní stálost prostředí

5. Technologický postup přípravy kontrolního kusu a přípravy vzorků pro mikroskop

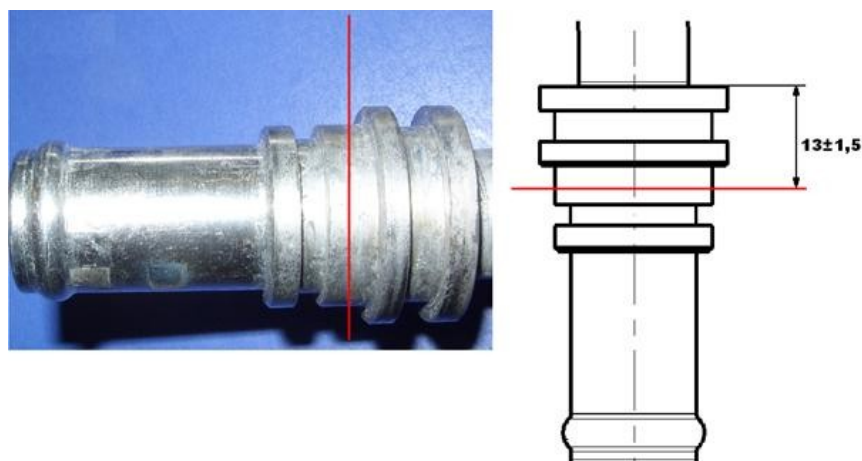
Pro vyhodnocení kvality spájeného dílu, je nutné ověřovat pájené dílce předepsaným technologickým postupem pro jejich kontrolu. Tento technologický postup je zpracován na základě požadavku pro ověřování dosažených pájených dílů, která rozhoduje o kvalitě či zmetkovitosti daných výrobků. Vyhodnocení bylo provedeno dle ČSN EN ISO 18279.

5.1 Technologický postup přípravy kontrolního kusu (0B2 300 333 A) pro řez:

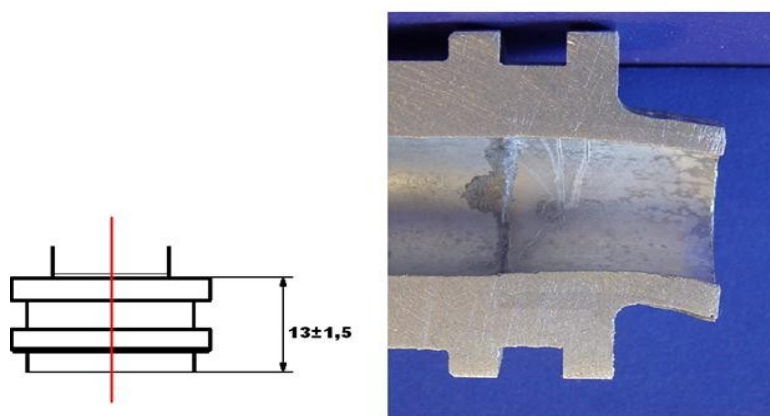
- 1) Uchopit díl a volně vložit do pásové pily, dotáhnout svěrák.
- 2) Uříznout koncovku dle obr. 48, vyjmout díl s pásové pily.
- 3) Vložit koncovku do pásové pily a uříznout $13 \pm 1,5\text{mm}$ od horního okraje dle obr. 49. Vyjmout díl s pásové pily.
- 4) Vložit díl do svěráku pásové pily, dotáhnout a provést řez dle obr. 50. Vyjmout díl z pásové pily.
- 5) Vložit do brousícího stroje "STRUERS" brusný papír o hrubosti 320, zapnout stroj.
- 6) Uchopit vzorek přiložit na brousící papír o hrubosti 320 a za stálého přilívání vody obrousit na hrubo.
- 7) Odložit vzorek, zastavit stroj a vyměnit brusný papír o hrubosti 320 za brus. papír o hrubosti 1000. Zapnout stroj.
- 8) Uchopit vzorek přiložit na brousící papír o hrubosti 1000 a za stálého přilévání vody obrousit na jemno.
- 9) Odložit vzorek, zastavit stroj a vyměnit brusný papír o hrubosti 1000 za leštící plátno. Zapnout stroj
- 10) Nanést na leštící plátno brusnou emulzi DIADUO o obsahu $3\mu\text{m}$, zapnout stroj, uchopit vzorek a vyleštit.



Obr. 48 Místo řezu č. 1



Obr. 49 Definování místa řezu



Obr. 50 Provedení řezu

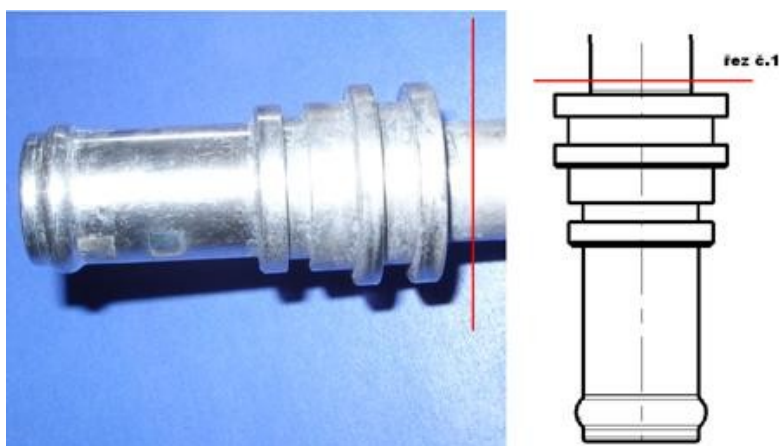
5.2 Technologický postup přípravy kontrolního kusu (0B2 300 333 A) pro mikroskop:

- 1) Uchopit trubku a označit pomocí záseků dle obr. 50 polohu pro vyhodnocení do stereomikroskopu.
- 2) Uchopit díl a volně vložit do pásové pily, dotáhnout svěrák.
- 3) Uříznout koncovku dle obr. 51, vyjmout díl z pásové pily.
- 4) Vložit koncovku do pásové pily a uříznout dle obr. 52. Vyjmout díl s pásové pily.
- 5) Vložit do brousícího stroje "STRUERS" brusný papír o hrubosti 120, zapnout stroj.
- 6) Uchopit vzorek přiložit na brousící papír o hrubosti 120 a za stálého přilívání vody obrousit na hrubo.
- 7) Odložit vzorek, zastavit stroj a vyměnit brusný papír o hrubosti 120 za brusný papír o hrubosti 600.

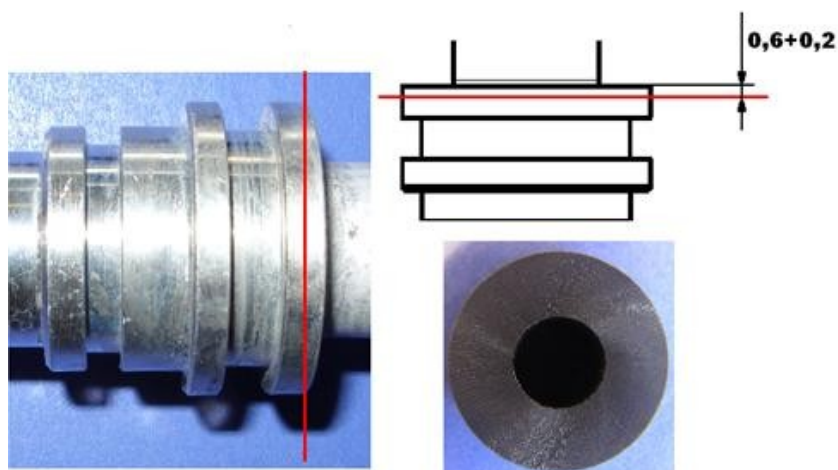
- 8) Odložit vzorek, zastavit stroj a vyměnit brusný papír o hrubosti 600 za brusný papír o hrubosti 800.
- 9) Odložit vzorek, zastavit stroj a vyměnit brusný papír o hrubosti 800 za brusný papír o hrubosti 1200.
- 10) Pro vyhodnocení výbrusů vložit vzorky do polohovacího přípravku dle obr. 53 a obr. 54 a za pomoci stereomikroskopu Olympus SZX 10, provést vyhodnocení pájeného spoje dle PP č. 116b. V případě že je broušená plocha znečištěna je třeba ji umýt technickým lihem.



Obr. 51 Označení koncovek pomocí záseků



Obr. 52 Provedení řezu koncovky



Obr. 53 Řez koncovky v daném místě a náhled na řez



Obr. 54 Vložení řezu koncovky do polohovacího přípravku

6. Závěr a zhodnocení dosažených výsledků

Problematika pájení tepelných výměníků je součástí výzkumu předních firem, využívající tepelné výměníky v sortimentu svých výrobků. Aplikace tepelných výměníků z hliníku v praxi se stává v dnešní době žádanější, než tomu bylo v minulosti a nejinak tomu bude i v budoucnosti, kde bude hliník a hliníkové slitiny vzhledem k jeho vlastnostem jeden z nejvyužívanějších kovů v průmyslu. Hliníkový tepelný výměník a problematika jeho pájení byla nastíněna i v této práci. Pájení hliníkových výměníků plamenem je jednou z nejhojněji využívaných metod pájení a návrh jeho nové technologie pájení může přinést mnoho odpovědí na jeho problematiku pájení, která je jeho největší nevýhodou a je stále předmětem

neustálého výzkumu, nicméně s postupným rychlým rozvojem průmyslu, se do budoucna dá počítat s návrhy nových technologií pro řešení této problematiky. Další částí této práce byl experiment s indukčním ohřevem, kdy bylo zjištěno, že indukčním ohřevem je pájení tepelných výměníků bez výrazných problémů, při dodržení základních požadavků procesu, jako u pájení plamenem. Mezi ty to požadavky patří čistota, množství tavidla, způsob a přesnost zakládání, teplotní stálost prostředí aj. Ovšem při zavedení této metody do sériové výroby, by bylo nutné pájet každou koncovku nezávisle na sobě, což by bylo jedním z hlavních problémů aplikace této metody do sériové výroby. Další možností pájení tepelných výměníků může být pájení v průběžných pecích, kdy lze vyrábět rychle a efektivně, ale nevýhodou je poměrně vysoká investice do zařízení. Závěrem lze říci, že při zvažování aplikace daných technologií a metod pájení, do výroby, je třeba vzít na vědomí, náročnost, dostupnost a využití dané technologie pro firmu, kde by snahou firmy mělo být co neefektivnější a nejméně nákladná výroba.

Výsledky této práce jsou v současné době využívány ve firmě ZKL Hanušovice, a.s. a vedly ke snížení počtu vadných výrobků a zvýšení efektivity práce ve firmě. Důležitým a cenným faktorem ovlivňujícím celkový návrh současně využívaných technologií, je důkladné zhodnocení problému a zvolení správné aplikace dané technologie.

Poděkování

Rád bych učinil poděkování všem, kteří mi byli nápomocní při zpracování této bakalářské práce. Tímto děkuji panu doc. Ing. Ivo Hlavatému Ph.D., za odborné vedení, rady a připomínky při zpracování této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Jiřímu Záluskému, konzultantovi bakalářské práce, za jeho čas, cenné rady a připomínky a pomoc při zpracování bakalářské práce

Závěrem také děkuji zaměstnancům firmy ZKL Hanušovice, a.s. za ochotu a poskytnuté cenné informace v praktickém provozu firmy.

Seznam použitých pramenů:

- [1] MICHNA, Štefan; LUKÁČ, Ivan; OČENÁŠEK, Vladivoj; KOŘENÝ, Rudolf; DRÁPALA, Jaromír; SCHNEIDER, Heinz; MIŠKUFOVÁ, Andrea. *Encyklopedie hliníku*. Adin, s.r.o., 2005. ISBN 80-89041-88-4. [online]. [cit. 2011-10-09]. Dostupné z: <<http://www.ulozto.cz/6300600/michna-encyklopedie-hliniku-pdf>>
- [2] KUČERA, Jan. *Teorie svařování*. 7. vydání. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1991. ISBN 04-202-86.
- [3] KOUKAL, J., SCHWARZ, D., HAJDÍK, J. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009, 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [4] HLAVATÝ, Ivo. *Teorie a technologie svařování*. - 93. [online]. [cit. 2011-11-15]. Dostupné z: <http://fs1.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-19-93laser.pdf>
- [5] KOUTNÝ, Jiří. *Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování* [online]. [cit. 2011-11-20]. Dostupné z: <<http://www.svarbazar.cz/phprs/storage/hlinik.pdf>>
- [6] *Historie hliníku* - [online]. [cit. 2011-11-20]. Dostupné z <http://www.hlinik.info/zajimavost/historie-hliniku>
- [7] ČSN EN 573-3. *Hliník a slitiny hliníku: Chemické složení a druhy tvářených výrobků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2009. [online]. [cit. 2012-4-14]. Dostupné z: <http://ulozto.cz/xMa5BuQ/csdn-en-573-3-hlinik-a-slitiny-hliniku-chemicke-slozeni-a-druhy-vyrobku-pdf>
- [8] *Hliník a jeho slitiny*. 41 s. [online]. [cit. 2012-4-14]. Dostupné z: <http://www.benjamin.ic.cz/hlinik_slitiny.pdf>
- [9] VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. 1. vydání. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [10] ZKL Hanušovice, a.s. *O společnosti* [online]. [cit. 2011.11.10] Dostupné z: <<http://www.zklhan.cz>>
- [11] DRIML, B. *Pájení a Lepení*. [online]. [cit. 2011-12-20]. Dostupné z: <<http://www.ulozto.cz/4018957/pajeni-doc>>

[12] Propojování v elektronice – elektrické spoje. In: [online]. [cit. 2012-01-15]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/08a_propojovani_v_elektronice.pdf>

[13] Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I : Hodnocení kvality svarového spoje. In: [online]. [cit. 2012-01-15]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def_kontrola_sv.pdf>

[14] KLAUBEROVÁ, Danuše. *SOUTĚŽNÍ PŘEHLÍDKA STUDENTSKÝCH A DOKTORSKÝCH PRACÍ FST 2007 OPTIMALIZACE PROCESU PÁJENÍ MĚŘENÝCH KOMPONENT GENERÁTORU*. [online]. [cit. 2011-12-20]. Dostupné z: <[http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST\(SVOC\)/_2007/_sbornik/PapersPdf/Ing/Klauberova_Danuse.pdf](http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST(SVOC)/_2007/_sbornik/PapersPdf/Ing/Klauberova_Danuse.pdf)>

[15] SCAME FORNI INDUSTRIALI S.p.A. *SCAME FORNI INDUSTRIALI S.p.A.* [online]. 2003, s. 14 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: www.tk-intech.wz.cz/data/SCAME%20Czech%20catalogue.pdf

[16] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektrotepelná zařízení*. Praha: IN-EL, 1997. ISBN 80-902333-2-5.

[17] PROCHÁZKA, Pavel. PP-tech, s.r.o. *PP-tech, s.r.o.* [online]. 2009 [cit. 2012-04-24]. Dostupné z: www.pp-tech.cz

[18] ČSN EN ISO 18279. *Tvrdé pájení - Vady v pájených spojích*. Praha: Český normalizační institut, 2004.

[19] HATCH, J. E. *Aluminium, Properties and Physical Metallurgy*. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1984.